

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# **Završni rad**

**Filip Škrapić**

Zagreb, 2016. godina

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

**Završni rad**

**Dinamika i regulacija procesa  
otplinjavanja**

Voditelj rada:

izv. prof. dr.sc. Dražen Lončar

Student:

Filip Škrapić

Zagreb, 2016. godina



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip ŠKRAPIĆ**

Mat. br.: 0035183050

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **DINAMIKA I REGULACIJA PROCESA OTPLINJAVANJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DEAERATION PROCESS DYNAMICS AND CONTROL**

Opis zadatka:

Otplinjač napojne vode važna je komponenta i novih termoelektranih postrojenja, kao što su elektrane na biomasu s vođeno parnim ciklusom ili solarne termoelektrane. Procesom otplinjavanja uklanjaju se plinovi iz napojne vode i smanjuje mogućnost nastanka korozije u cijevima vođeno-parnog trakta.

Otplinjač je spregnut s napojnim spremnikom, a sustav regulacije jamči održavanje potrebne razine napojne vode i tlaka u spremniku u svim pogonskim režimima.

U okviru rada potrebno je:

1. Izvesti matematički model termohidrauličkih procesa u otplinjaču i pripadajućem spremniku napojne vode;
2. Definirati viševarijabilni sustav regulacije razine napojne vode i tlaka u spremniku;
3. Simulirati utjecaj promjenjivih pogonskih režima (pokretanje, povećanje i smanjivanje snage) na odzive reguliranih varijabli.

U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016
2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr.sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, izv. prof. dr. sc. Draženu Lončaru i asistentu, mag. ing. mech. Anti Marušiću na vođenju i potpori.

Filip Škrapić

## Sadržaj

<b>Sadržaj.....</b>	<b>I</b>
<b>Popis oznaka.....</b>	<b>III</b>
<b>Popis slika.....</b>	<b>V</b>
<b>Sažetak.....</b>	<b>VII</b>
<b>Summary.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Uvod.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Opis objekta simulacije.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Henryev zakon.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Izvod matematičkog modela.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1. Bilanca mase.....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. Bilanca energije.....</b>	<b>6</b>
<b>3.3. Volumen spremnika.....</b>	<b>6</b>
<b>3.4. Jednadžbe strujanja vodene pare kroz granicu sustava.....</b>	<b>7</b>
<b>3.5. Poprečna površina.....</b>	<b>8</b>
<b>3.6. Prikaz matematičkog modela.....</b>	<b>10</b>
<b>4. Stacionarno stanje otplinjača.....</b>	<b>11</b>
<b>4.1. Analiza odaziva procesnih veličina pri stacionarnom stanju.....</b>	<b>11</b>
<b>4.1.1. Poremećaj protoka vode iz kondenzatora.....</b>	<b>12</b>
<b>4.1.2. Poremećaj protoka dodatne vode.....</b>	<b>13</b>
<b>4.1.3. Poremećaj protoka pregrijane pare.....</b>	<b>14</b>
<b>4.1.4. Poremećaj protoka pare za hladno međupregrijavanje.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1.5. Poremećaj protoka napojne vode.....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.6. Analiza.....</b>	<b>17</b>
<b>4.2. Koncept regulacije otplinjača.....</b>	<b>19</b>
<b>5. Regulacija procesa.....</b>	<b>21</b>
<b>5.1. Nadređena i podređena regulacija.....</b>	<b>21</b>

<b>5.2. PID regulator.....</b>	<b>22</b>
<b>5.3. Referentno stanje simulacije.....</b>	<b>22</b>
<b>5.4. Analiza odaziva reguliranih veličina pri referentnom stanju.....</b>	<b>23</b>
<b>5.4.1. Promjena zadane razine stupca vode.....</b>	<b>24</b>
<b>5.4.2. Promjena zadane temperature isparavanja.....</b>	<b>26</b>
<b>5.4.3. Promjena zadanog tlaka u otplinjaču.....</b>	<b>27</b>
<b>5.4.4. Analiza.....</b>	<b>28</b>
<b>6. Simulacija.....</b>	<b>32</b>
<b>7. Zaključak.....</b>	<b>37</b>
<b>8. Literatura.....</b>	<b>38</b>
<b>9. Prilog – Simulink sheme modela.....</b>	<b>39</b>

## Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
$m_{kv}$	$kg/s$	Maseni protok vode iz kondenzatora
$m_{dv}$	$kg/s$	Maseni protok dodatne vode
$m_{nv}$	$kg/s$	Maseni protok napojne vode
$m_{pp}$	$kg/s$	Maseni protok pregrijane pare
$m_{mp}$	$kg/s$	Maseni protok pare za hladno međupregrijanje
$m_{ip}$	$kg/s$	Maseni protok pare na izlazu iz spremnika napojne vode
$p_{rad}$	$bar$	Radni tlak
$p_{ok}$	$bar$	Tlak okoliša
$p_{pp}$	$bar$	Tlak pregrijane pare
$p_{prigpp}$	$bar$	Tlak prigušenja pregrijane pare
$p_{mp}$	$bar$	Tlak pare za hladno međupregrijanje
$\rho$	$kg/m^3$	Gustoća vode
$V_{snv}$	$m^3$	Volumen spremnika
$L$	$m$	Duljina spremnika
$r$	$m$	Polumjer spremnika
$r_2$	$m$	Polumjer cijevi za ispuštanje pare iz spremnika
$r_1$	$m$	Polumjer cijevi za dovodenje pregrijane pare
$r_1$	$m$	Polumjer cijevi za dovodenje pare za hladno međupregrijanje
$h_1$	$m$	Radna razina vode
$\vartheta_0$	$^{\circ}C$	Početna temperatura vode u spremniku
$\vartheta_{kv}$	$^{\circ}C$	Temperatura vode iz kondenzatora
$\vartheta_{dv}$	$^{\circ}C$	Temperatura dodatne vode
$\vartheta_{pp}$	$^{\circ}C$	Temperatura pregrijane pare
$\vartheta_{mp}$	$^{\circ}C$	Temperatura pare za hladno međupregrijanje
$h_{kv}$	$KJ/kg$	Specifična entalpija vode iz kondenzatora
$h_{dv}$	$KJ/kg$	Specifična entalpija dodatne vode
$h_0$	$KJ/kg$	Početna specifična entalpija vode u spremniku

Oznaka	Jedinica	Opis
$h_{pp}$	$KJ/kg$	Specifična entalpija pregrijane pare
$h_{mp}$	$KJ/kg$	Specifična entalpija pare za hladno međupregrijanje
$h_{vk}$	$KJ/kg$	Specifična entalpija vrele kapljevite vode
$h_{ip}$	$KJ/kg$	Specifična entalpija vodene pare



## Popis slika

Slika 1.	Otplinjač (spremnik napojne vode).....	2
Slika 2.	Shema integracije otplinjača u parnoturbinski proces.....	3
Slika 3.	Dijagram topljivosti kisika u vodi o zavisnosti o temperaturi i tlaku.....	4
Slika 4.	Poprečni presjek pretpostavljenog matematičkog modela.....	8
Slika 5.	Krivulja visine kao funkcija površine.....	9
Slika 6.	Shema spajanja matematičkog modela.....	10
Slika 7.	Promjena procesnih veličina pri poremećaju masenog protoka vode iz kondenzatora.....	12
Slika 8.	Promjena procesnih veličina pri poremećaju masenog protoka dodatne vode...	13
Slika 9.	Promjena procesnih veličina pri poremećaju tlaka prigušenja pregrijane pare..	14
Slika 10.	Promjena procesnih veličina pri poremećaju tlaka prigušenja pare za hl. međupreg.....	15
Slika 11.	Promjena procesnih veličina pri poremećaju masenog protoka napojne vode...	16
Slika 12.	Poremećaj masenih tokova pri poremećaju tlaka prigušenja pare za hl. međupreg.....	18
Slika 13.	Koncept regulacijskog kruga razine stupca vode.....	19
Slika 14.	Koncept regulacijskog kruga temperature.....	19
Slika 15.	Koncept regulacijskog kruga tlaka.....	20
Slika 16.	Opći prikaz regulacijskog kruga.....	21
Slika 17.	Promjena razine stupca vode pri promjeni P i I parametara bržeg regulatora....	24
Slika 18.	Promjena razine stupca vode pri promjeni P i I parametara sporijeg regulatora	25
Slika 19.	Promjena temperature pri promjeni P i I parametara regulatora temperature....	26
Slika 20.	Promjena tlaka pri promjeni P i I parametara regulatora tlaka.....	27
Slika 21.	Maseni protoci pri refentnom stanju i poremećaju tlaka iz 4.4.3.....	29
Slika 22.	Promjena tlaka i temperature pri tlaku prigušenja pregrijane pare 2.5 bar.....	30
Slika 23.	Maseni protoci pri tlaku prigušenja pregrijane pare 2.5 bar i poremećaju tlaka	31
Slika 24.	Odaziv reguliranih veličina pri povećanju protoka napojne vode i povećanja tlaka.....	33

Slika 25.	Promjena masenih protoka pri poremećaju napojne vode i tlaka iz slike 24.....	34
Slika 26.	Odaziv reguliranih veličina pri smanjenju protoka napojne vode i smanjenju tlaka.....	35
Slika 27.	Promjena masenih protoka pri poremećaju napojne vode i tlaka iz slike 26.....	36

## Sažetak

U radu je analizirana dinamika i regulacija procesa otplinjavanja u otplinjaču termoenergetskog postrojenja. Za otplinjač je izveden matematički model dinamike procesa koji je konstruiran u Simulink-u. Analizirani su odzivi otvorenog kruga procesnih veličina pri stacionarnom stanju uslijed vanjskih poremećaja. Pri referentnom stanju analiziran je model i parametri regulacije uslijed poremećaja reguliranih veličina.

## Summary

Deaeration process dynamics and control capabilities have been analysed in this paper. Mathematical model and Simulink layout have been derived for deaeration process dynamics. Multiple stationary open-circle process values have been analysed upon external disruption. Control model and parameters have been tested on a initial referent state under internal and external disruption.

## 1. Uvod

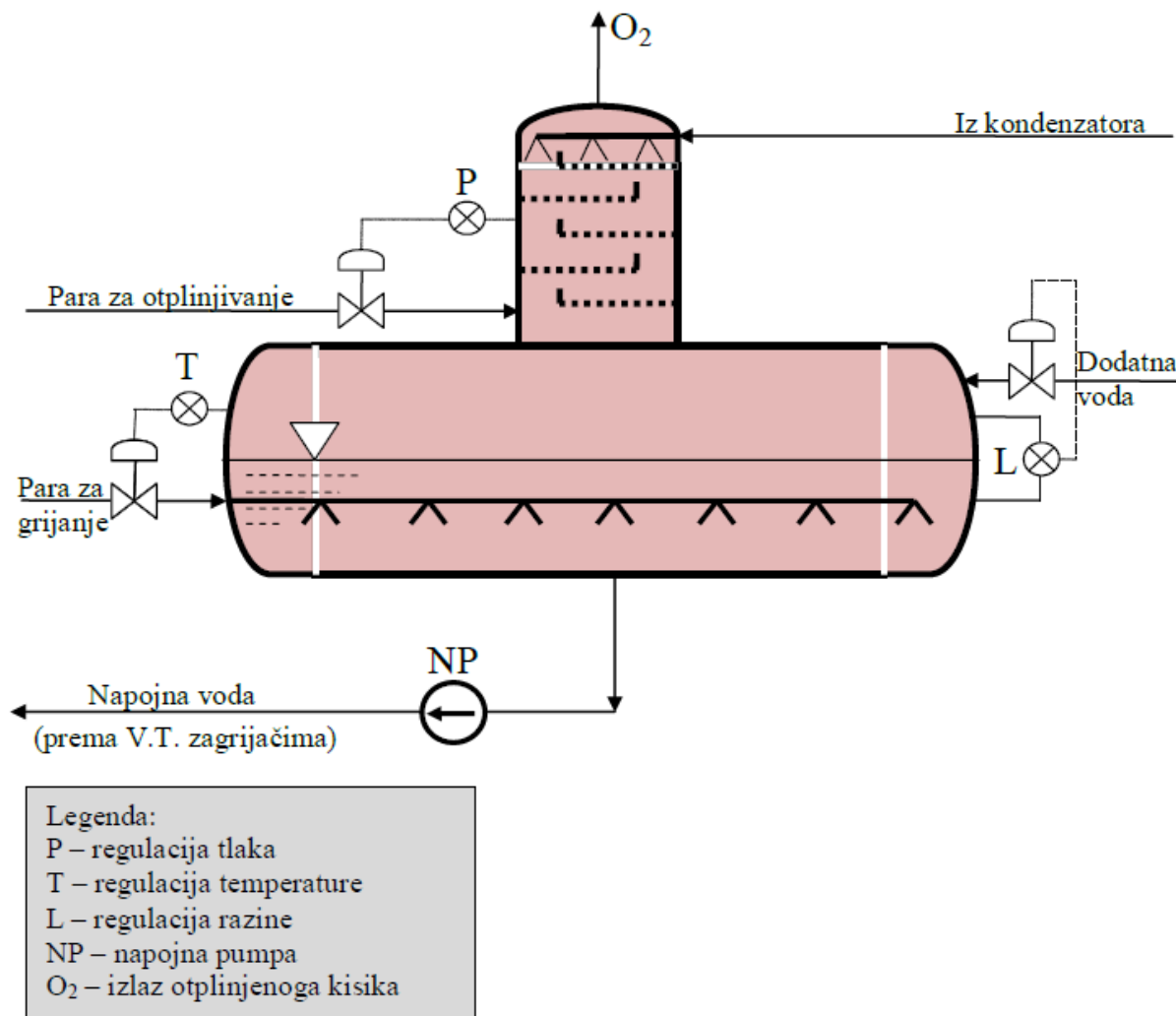
U današnje doba, kada Europskom unijom prevladava težnja za što većim uštedama, tj. što većom iskoristivosti i fleksibilnosti, u termoenergetska postrojenja se uvodi sve preciznija regulacija i kontrola s ciljem poboljšanja dinamike procesa promjene opterećenja. Implementacija sustava vođenja i regulacije termoenergetskog bloka jedna je od najaktrativnijih modifikacija na postojećim postrojenjima zbog relativno niske investicije i značajnog poboljšanja regulacije procesa.

Prije nego li se ove implementacije uvedu u sustav, potrebno ih je provjeriti na numeričkom modelu. Ovaj proces provjere se vrši pomoću simulacijskih alata koji nam omogućuju detaljan uvid, ako se tehnološki procesi pravilno matematički opišu, u dinamiku postrojenja i njegovih pojedinih komponenti pri promjeni opterećenja bloka. Simulacije se najčešće izvode za dijelove postrojenja koje mogu izazvati najviše problema pri promjeni opterećenja. Jedan od tih dijelova postrojenja je i otplinjač, tj. spremnik napojne vode.

Najčešći problemi koji se mogu pojaviti prilikom rada otplinjača su pojava kavitacije na napojnoj pumpi i začepeljivanje odvodnih cijevi zbog mulja. Zbog eliminacije tih problema, vrlo je važno održati razinu vode i tlak u otplinjaču na zadanoj vrijednosti.

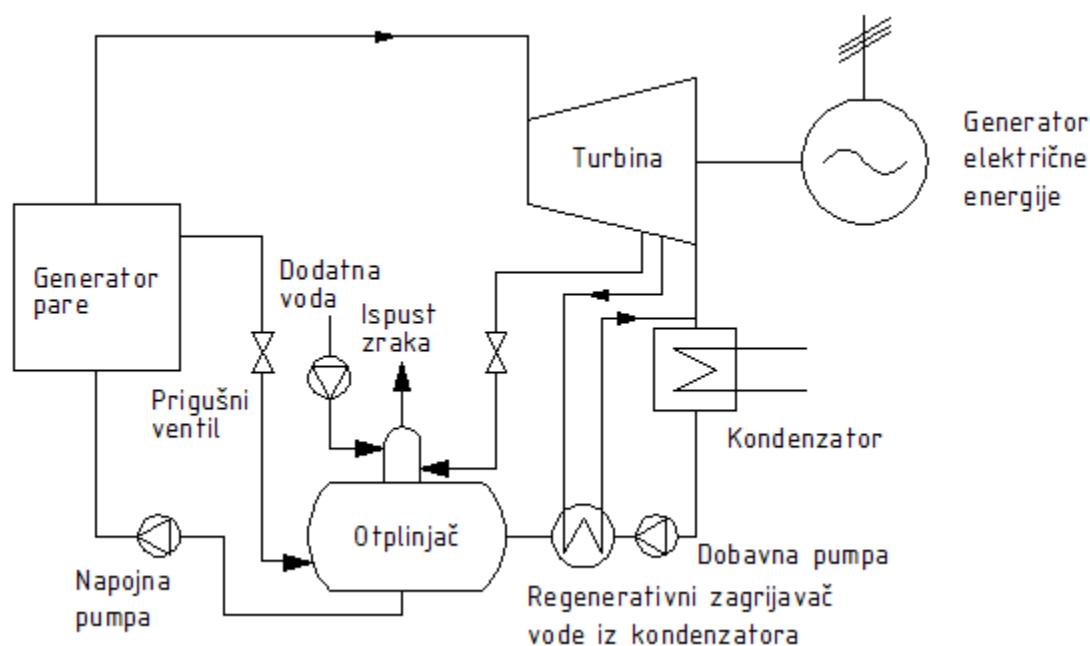
## 2. Opis objekta simulacije

Objekt simulacije je otplinjač. Otplinjač je uređaj koji se koristi za termičko otplinjavanje i akumuliranje napojne vode u sustavima unutar kojih struji voda bez obzira na agregatno stanje, odnosno, u sustavima koji koriste vodenu paru kao radnu tvar u tehnološkim procesima.



Slika 1. Otplinjač (spremnik napojne vode)

Termičko otplinjavanje je proces koji se primjenjuje kako bi se uklonili otopljeni plinovi (kisik i ugljikov dioksid) iz vode. Količina otopljenih plinova u vodi ovisi o temperaturi vode i tlaku iznad slobodne površine. Topljivost plinova u vodi smanjuje se s porastom temperature vode i pada na najmanju vrijednost na temperaturi vrelišta. Povećanjem tlaka iznad slobodne površine topljivost plinova raste. Topljivost plinova u kapljevinu opisana je Henryevim zakonom.



Slika 2. Shema integracije otplinjača u parnoturbinski proces

## 2.1. Henryev zakon

Henryev zakon kaže da je topljivost plinova u kapljevine direktno proporcionalana s tlakom plina iznad tekućine.

$$p = k_H * c$$

gdje je:

$p$  ... parcijalni tlak otopljenog plina [Pa]

$c$  ... koncentracija otopljene tvari [mg/L]

$k_H$  ... Henryeva konstanta

Henryeva konstanta zavisi o temperaturi, a ta korelacija se može približno opisati jednačbom

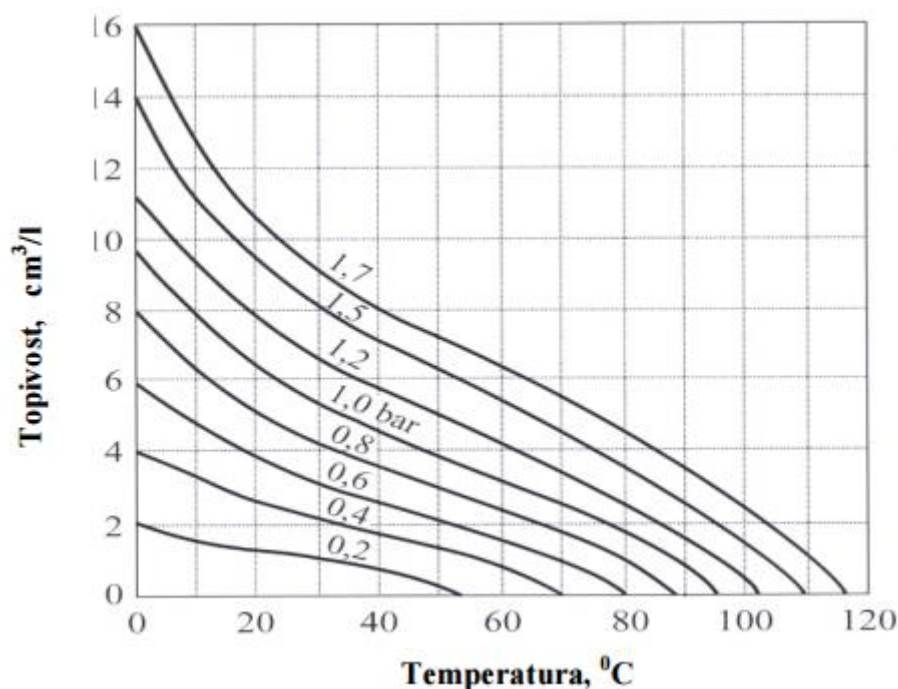
$$k_H(T) = k_H(T_{ref}) * e^{\left[ C * \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]}$$

gdje je:

$k_H(T)$  ... Henryeva konstanta pri T temperaturi

$k_H(T_{ref})$  ... Henryeva konstanta pri referentnoj temperaturi od 298K

$C$  ... konstata zavisna o vrsti plina (npr. za kisik  $C = 1700K$ )



Slika 3. Dijagram topljivost kisika u vodi u zavisnosti o temperaturi i tlaku

Svrha otplinjavanja je odstranjivanje otopljenog kisika i ugljikovog dioksida kako bi se spriječilo korozivno djelovanje kisika u sustavu unutar kojih struji voda. Naročito je važno da se korozijski procesi spriječe kod tehnoloških procesa koji rade pri povišenim temperaturama i naprezanju materijala. Naime, korozijski procesi ubrzano djeluju pri povišenim temperaturama što u kombinaciji s visokonapregnutim dijelovima postrojenja može dovesti do iznenadnih oštećenja i gubitka kontrole.

Kako bi zagrijali vodu do temperature vrelišta, u otplinjač se dovodi pregrijana para iz generatora pare koja se potom u direktnom kontaktu miješa u protustrujnom strujanju s vodom unutar otplinjača. Zbog toplinske neravnoteže pregrijana para predaje toplinu kapljevitoj vodi unutar spremnika. Dio pregrijane pare kondenzira, a dio kapljevite vode u spremniku ispari u vodenu paru. Temperatura isparavanja odgovara tlaku iznad slobodne površine vode, a taj tlak je proporcionalan količini pare iznad slobodne površine.



### 3. Izvod matematičkog modela

Otplinjač, tj. spremnik napojne vode zamišljen je kao mješalište u koje ulazi kapljevita voda i pregrijana vodena para. Matematički model sastoji se od bilance mase i bilance energije dovedenih i odvedenih masenih tokova. Iz omjera ukupne entalpije i mase sustava dobije se specifična entalpija ( $h$ ) mokre pare iz koje se, zajedno sa srednjom gustoćom vode ( $\rho_{sr}$ ), pomoću XSteam funkcije, određuje tlak ( $p$ ) iznad slobodne površine. Srednja gustoća vode ( $\rho_{sr}$ ) dobije se omjerom mase vode u sustavu i unutarnjeg volumena otplinjača. XSteam je funkcija unutar MATLAB-a koja sadrži pohranjene podatke o veličinama stanja kapljevite vode i vodene pare za različite tlakove i temperature.

$$p = p(h, \rho_{sr}); \quad \rho_{sr} = \frac{M}{V_{snv}}$$

Sadržaj pare ( $x$ ) i temperatura ( $\vartheta$ ) određeni su, pomoću XSteam funkcije, stanjem specifične entalpije "mokre pare" i tlaka.

$$x = x(h, p); \quad \vartheta = \vartheta(h, p)$$

Maseni protoci pregrijane pare, pare za hladno međupregrijanje i vodene pare koja izlazi iz otplinjača modelirani su preko Bernoullijeve jednadžbe za strujnicu.

Pretpostavke matematičkog modela:

- idealno miješanje svih dovedenih tokova
- trenutačna izmjena topline
- izmjena topline između sustava i okoliša se zanemaruje zbog izoliranosti spremnika
- spremnik je cilindričnog oblika

#### 3.1. Bilanca mase

Zakon očuvanja mase glasi:

Brzina promjene mase otvorenog sustava jednaka je razlici zbroja masenih tokova što ulaze u sustav i zbroja masenih tokova što izlaze iz sustava.

$$\frac{dM}{dt} = \sum m_u - \sum m_i \quad (1)$$

Kada se taj zakon primjeni na objekt simulacije i uvrste se sve oznake dobije se jednadžba oblika:

$$\frac{dM}{dt} = m_{kv} + m_{dv} + m_{pp} + m_{mp} - m_{nv} - m_{ip} \quad (2)$$

gdje  $M$  označava masu vode u sustavu bez obzira na agregatno stanje.

### 3.2. Bilanca energije

Zakon očuvanja energije glasi:

Brzina promjene energije otvorenog sustava jednaka je razlici zbroja tokova energije što ulaze u sustav i zbroja tokova energije što izlaze iz sustava.

$$\frac{dE}{dt} = \sum E_u - \sum E_i \quad (3)$$

Kada se taj zakon primjeni na objekt simulacije i uvrste se sve oznake dobije se jednadžba oblika:

$$\frac{dH}{dt} = m_{kv} * h_{kv} + m_{dv} * h_{dv} + m_{pp} * h_{pp} + m_{mp} * h_{mp} - m_{nv} * h_{vk} - m_{ip} * h_{ip} \quad (4)$$

gdje  $H$  označava sadržaj entalpije vode,  $h_{vk}$  označava specifičnu entalpiju vrele kapljevine određene preko tlaka  $p$ , a  $h_{ip}$  označava specifičnu entalpiju suhozasićene pare isto tako određene preko tlaka  $p$ .

$$h_{vk} = h_{vk}(p); \quad h_{szp} = h_{szp}(p)$$

Vrijednosti specifičnih ulaznih entalpija ( $h_{kv}, h_{dv}, h_{pp}, h_{mp}$ ) uzete su kao konstantne vrijednosti koje zavise o tlakovima i temperaturama.

$$h_{kv} = h_{kv}(p_{rad}, \vartheta_{kv}); \quad h_{dv} = h_{dv}(p_{rad}, \vartheta_{dv}); \quad h_{pp} = h_{pp}(p_{pp}, \vartheta_{pp}); \quad h_{mp} = h_{mp}(p_{mp}, \vartheta_{mp})$$

### 3.3. Volumen spremnika

Spremnik napojne vode zamišljen je kao šuplji cilindar definiran unutarnjim polumjerom i duljinom spremnika.

$$V_{snv} = r^2 * \pi * L \quad (5)$$

### 3.4. Jednadžbe strujanja vodene pare kroz granicu sustava

Kao što je već prije rečeno, maseni protoci vodene pare opisani su preko Bernoullijeve jednadžbe za strujnicu.

Maseni protok pregrijane pare

$$m_{pp} = r_2^2 * \pi * \sqrt{2 * \rho_{prigpp} * (p_{prigpp} - p)} \quad (6)$$

gdje  $\rho_{prigpp}$  označava gustoću prigušene pregrijane pare određene tlakom prigušenja i temperaturom pregrijane pare pomoću XSteam funkcije.

$$\rho_{prigpp} = \rho_{prigpp}(p_{prigpp}, \vartheta_{pp})$$

Maseni protok pare za hladno međupregrijanje

$$m_{mp} = r_2^2 * \pi * \sqrt{2 * \rho_{mp} * (p_{mp} - p)} \quad (7)$$

gdje  $\rho_{mp}$  označava gustoću pare za hladno međupregrijanje određene tlakom pare za hladno međupregrijanje i temperaturom pare za hladno međupregrijanje pomoću XSteam funkcije.

$$\rho_{mp} = \rho_{mp}(p_{mp}, \vartheta_{mp})$$

Maseni protok vodene pare na izlazu iz otplinjača

$$m_{ip} = r_1^2 * \pi * \sqrt{2 * \rho_{szp} * (p - p_{ok})} \quad (8)$$

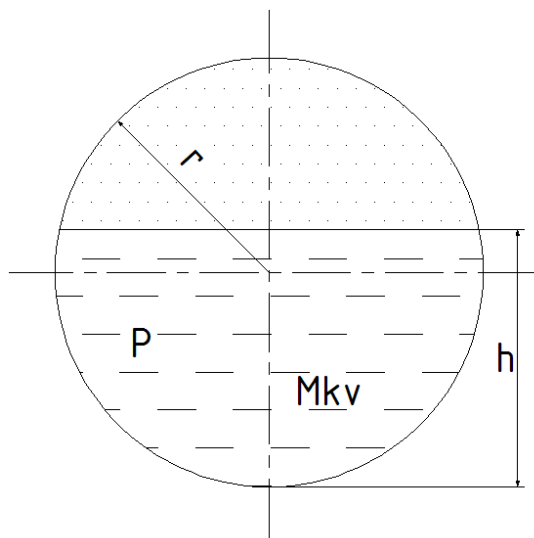
gdje  $\rho_{szp}$  označava gustoću suhozasićene vodene pare pri tlaku u spremniku određene pomoću XSteam funkcije.

$$\rho_{szp} = \rho_{szp}(p)$$

### 3.5. Poprečna površina

Poprečna površina stupca kapljevite vode definirana je visinom razine vode i polumjerom spremnika napojne vode jednažbom:

$$P = r^2 * \cos^{-1} \left( \frac{r-h}{r} \right) - \sqrt{r^2 - (r-h)^2} * (r-h) \quad (9)$$



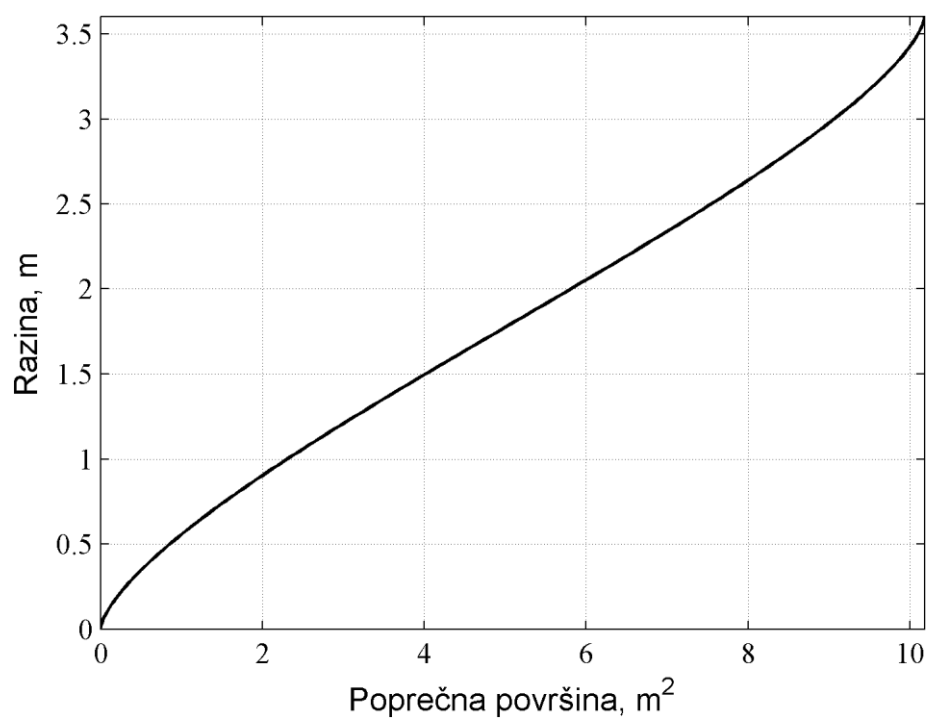
Slika 4. Poprečni presjek pretpostavljenog matematičkog modela

Poprečna površina je isto tako definirana omjerom mase kapljevite vode naspram umnoška gustoće i duljine spremnika jednažbom:

$$P = \frac{M * (1 - x)}{\rho * L} = \frac{M_{kv}}{\rho * L} \quad (10)$$

Kombinacijom ovih jednažbi moguće je, izračunati visinu razine kapljevite vode preko mase kapljevite vode, gustoće i dimenzija spremnika.

Odredi se krivulja visine kao funkcija površine iz jednadžbe (9).

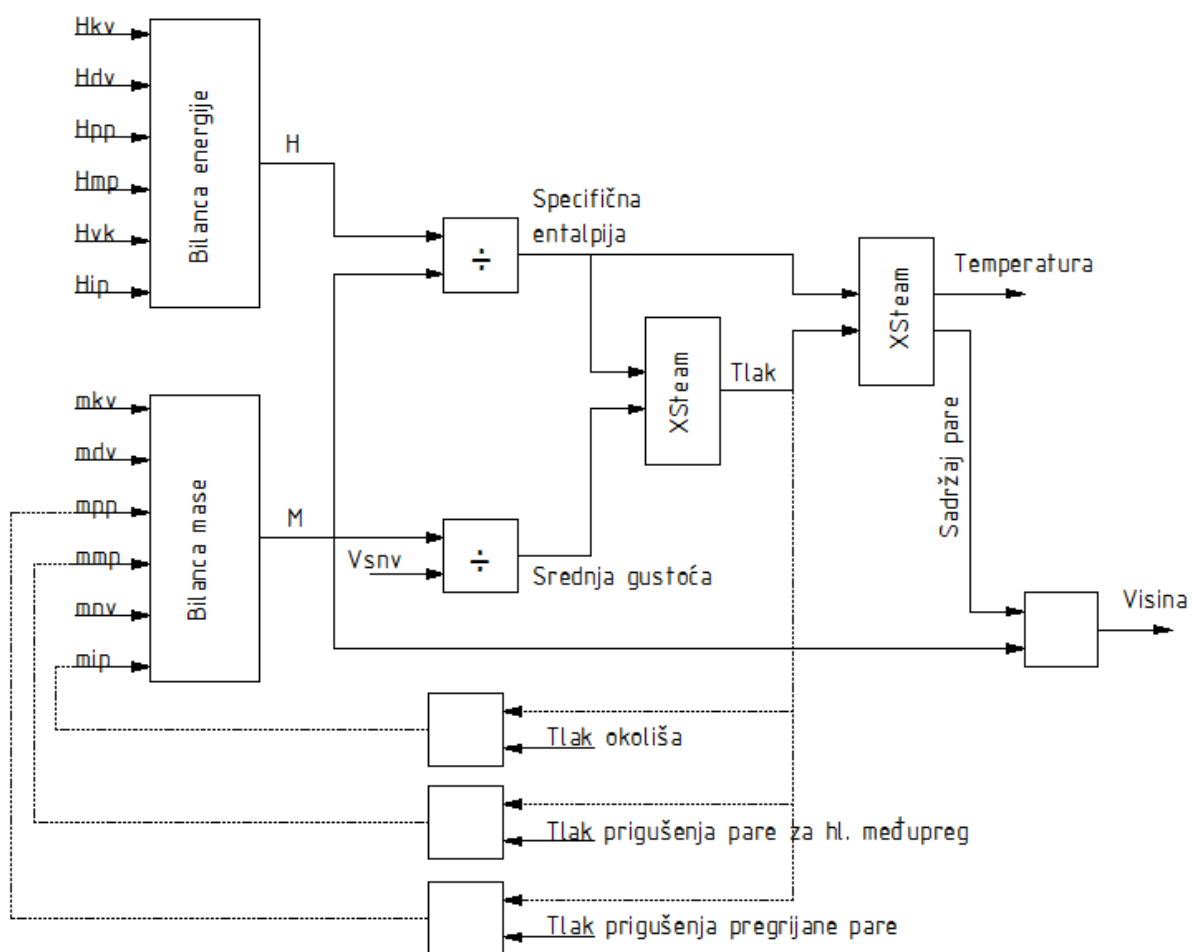


Slika 5. Krivulja visine kao funkcija površine

Zatim se za površinu, dobivene iz jednadžbe (10), pronade odgovarajuća razina visine kapljevite vode u spremniku. Ovom metodom samo se aproksimira stvarna razina kapljevite vode jer se krivulja računa preko koraka, ali se istovremeno može uzeti jako velik broj koraka te se tako greška smanjuje.

### 3.6. Prikaz matematičkog modela

Sada su poznate sve tražene vrijednosti (tlak iznad slobodne površine, temperatura kapljevite vode i razina visine) matematičkog modela.



Slika 6. Shema spajanja matematičkog modela

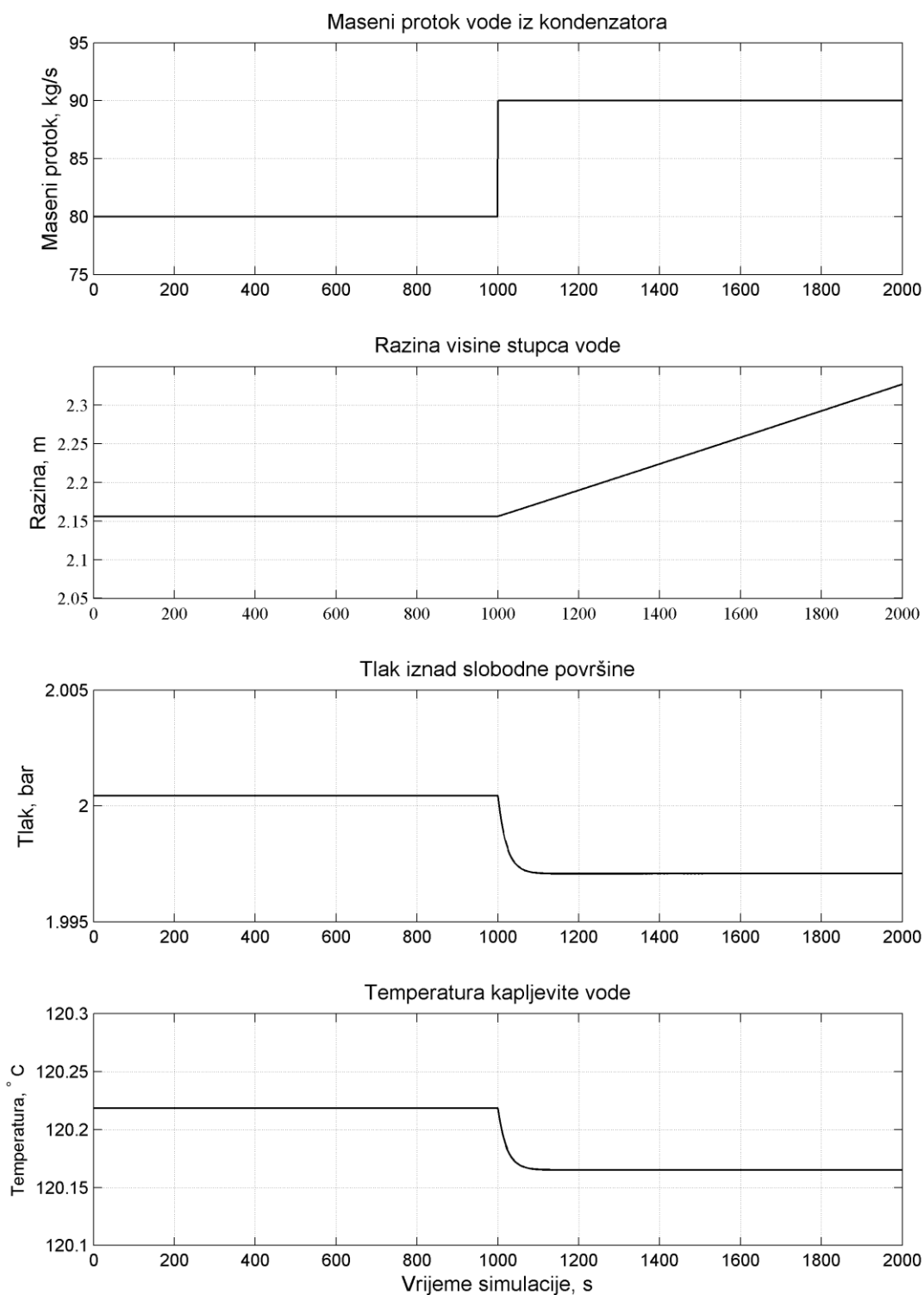
## 4. Stacionarno stanje otplinjača

Stacionarno stanje otplinjača postignuto je za tlak iznad slobodne površine 2.0004 bar i razinu vodenog stupca 2.16 m. Stacionarnom stanju otplinjača odgovara maseni protok vode iz kondenzatora od 80 kg/s, maseni protok dodatne vode od 10 kg/s i maseni protok napojne vode od 127.56 kg/s. Duljina spremnika je 20 m, a promjer spremnika je 3.6 m. Unutarnji promjer cijevi za dovod pregrijane pare je 0.25 m, u otplinjač ulaze 4 takve cijevi, isto vrijedi i za unutarnji promjer i količinu cijevi za dovod pare za hladno međupregrijanje. Ulazna temperatura vode iz kondenzatora je 90°C, temperatura dodatne vode iznosi 20°C. Pregrijana para se uzima iz generatora pare pri tlaku 180 bar i temperaturi 274°C, prije ulaza u otplinjač, pregrijana pare se prigušuje na tlak od 2.3 bar. Para za hladno međupregrijanje oduzima se iz niskotlačnog dijela turbine pri temperaturi 130°C i prigušuje na 2.27 bar. Kako bi se aproksimirala gustoća heterogene smjese kapljevite vode u kojoj se nalaze mjehurići pare, uzima se da gustoća kapljevite vode u spremniku iznosi 900 kg/m<sup>3</sup>. Tlak okoliša iznosi 1.01 bar.

### 4.1. Analiza odaziva procesnih veličina pri stacionarnom stanju

Kako bi se izvršila analiza odaziva procesnih veličina pri stacionarnom stanju, vrši se promjena masenih protoka pri stacionarnom stanju procesa i bilježi se odaziv razine stupca vode, tlaka iznad slobodne površine i temperature kapljevite vode.

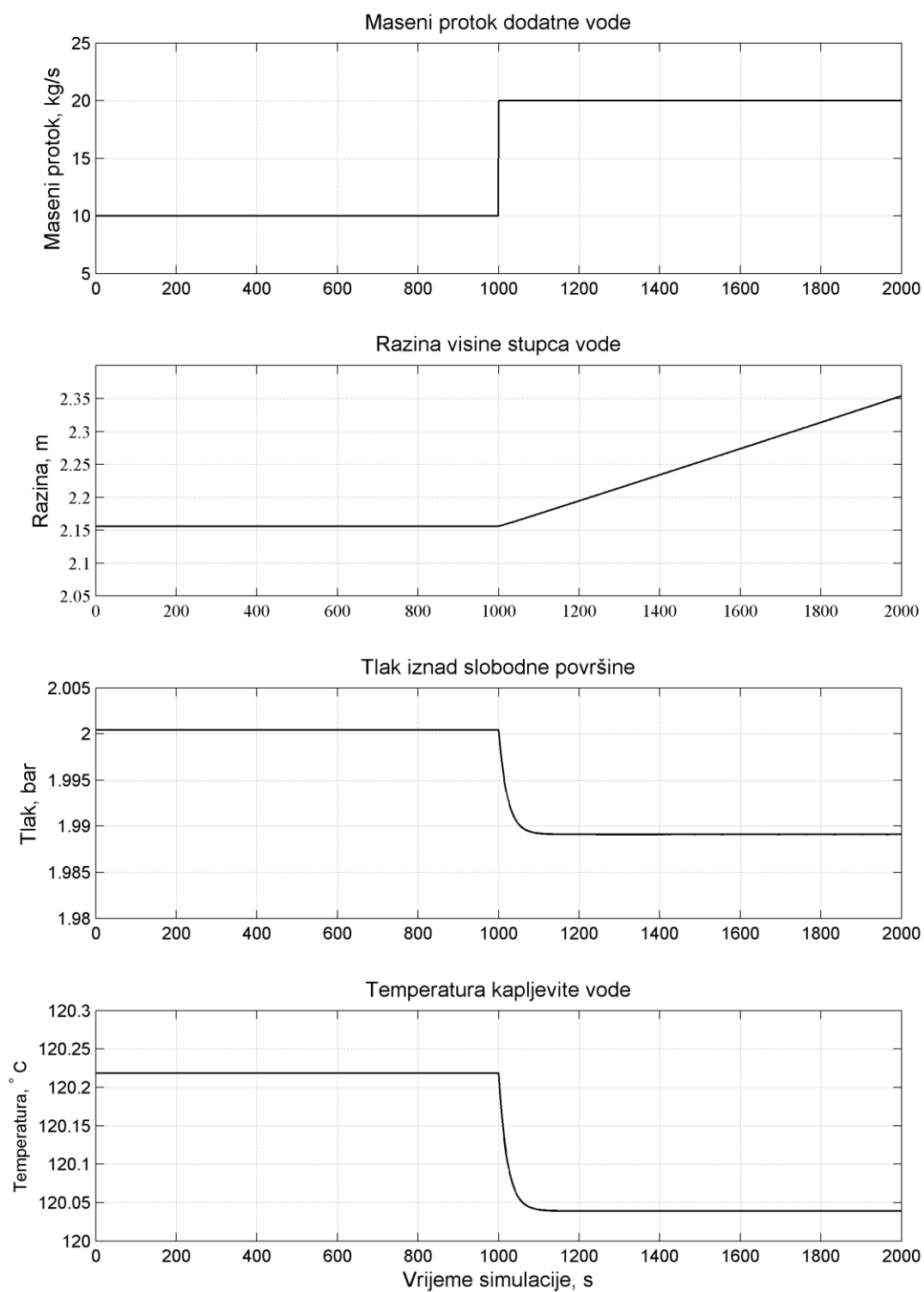
### 4.1.1. Promjena protoka vode iz kondenzatora



Slika 7. Promjena procesnih veličina pri poremećaju masenog protoka vode iz kondenzatora

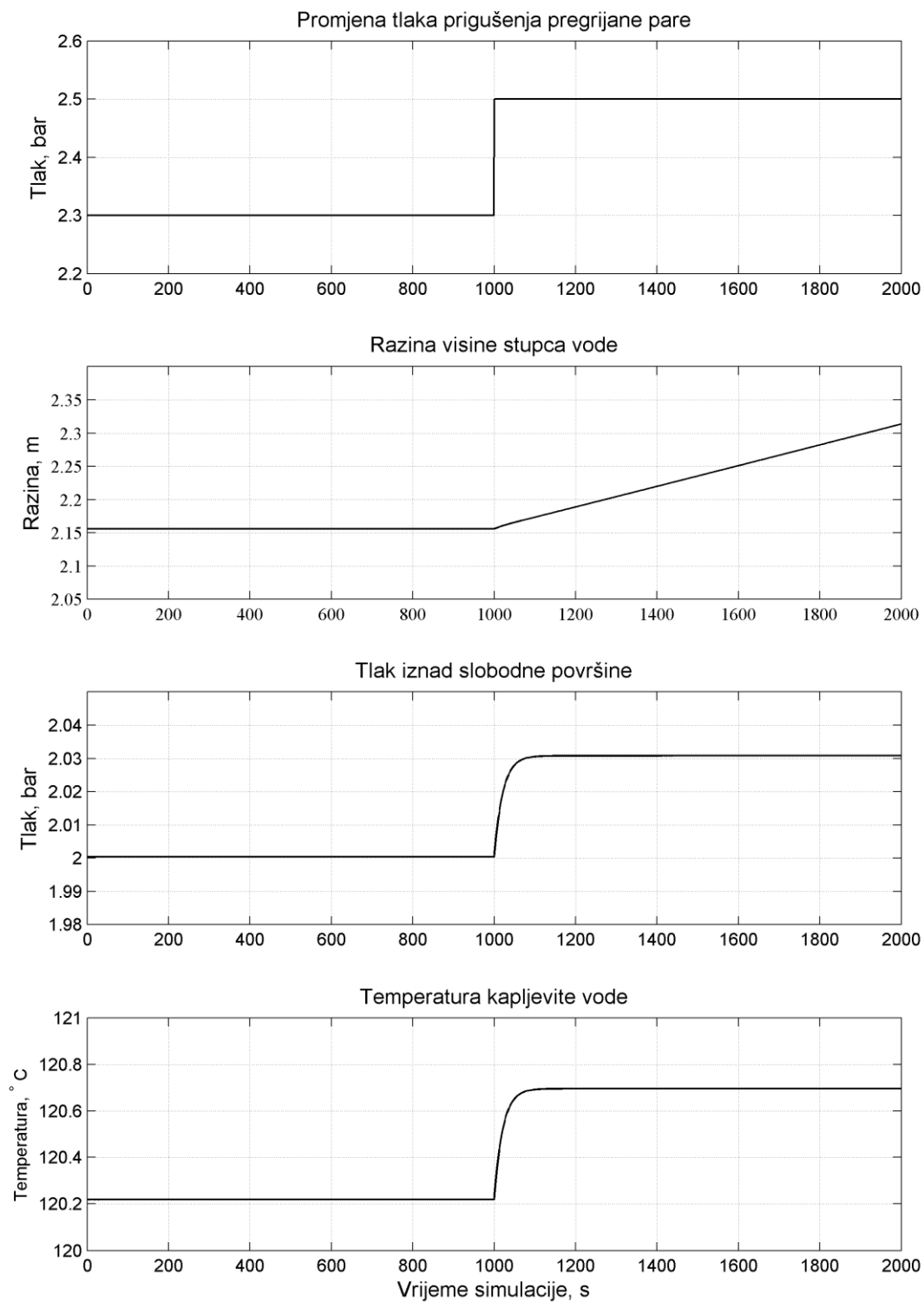


### 4.1.2. Promjena protoka dodatne vode



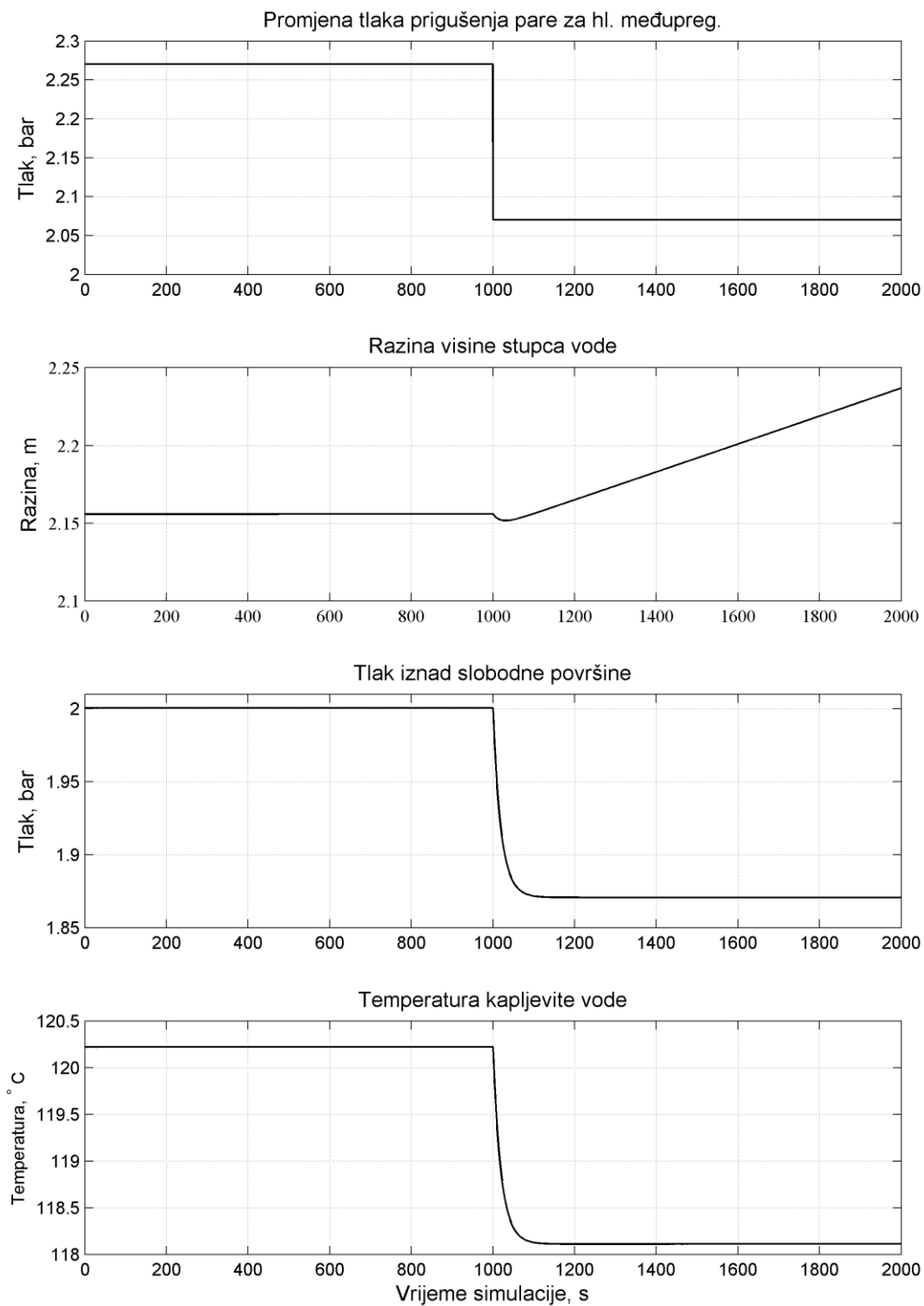
Slika 8. Promjena procesnih veličina pri poremećaju masenog protoka dodatne vode

### 4.1.3. Promjena protoka pregrijane pare



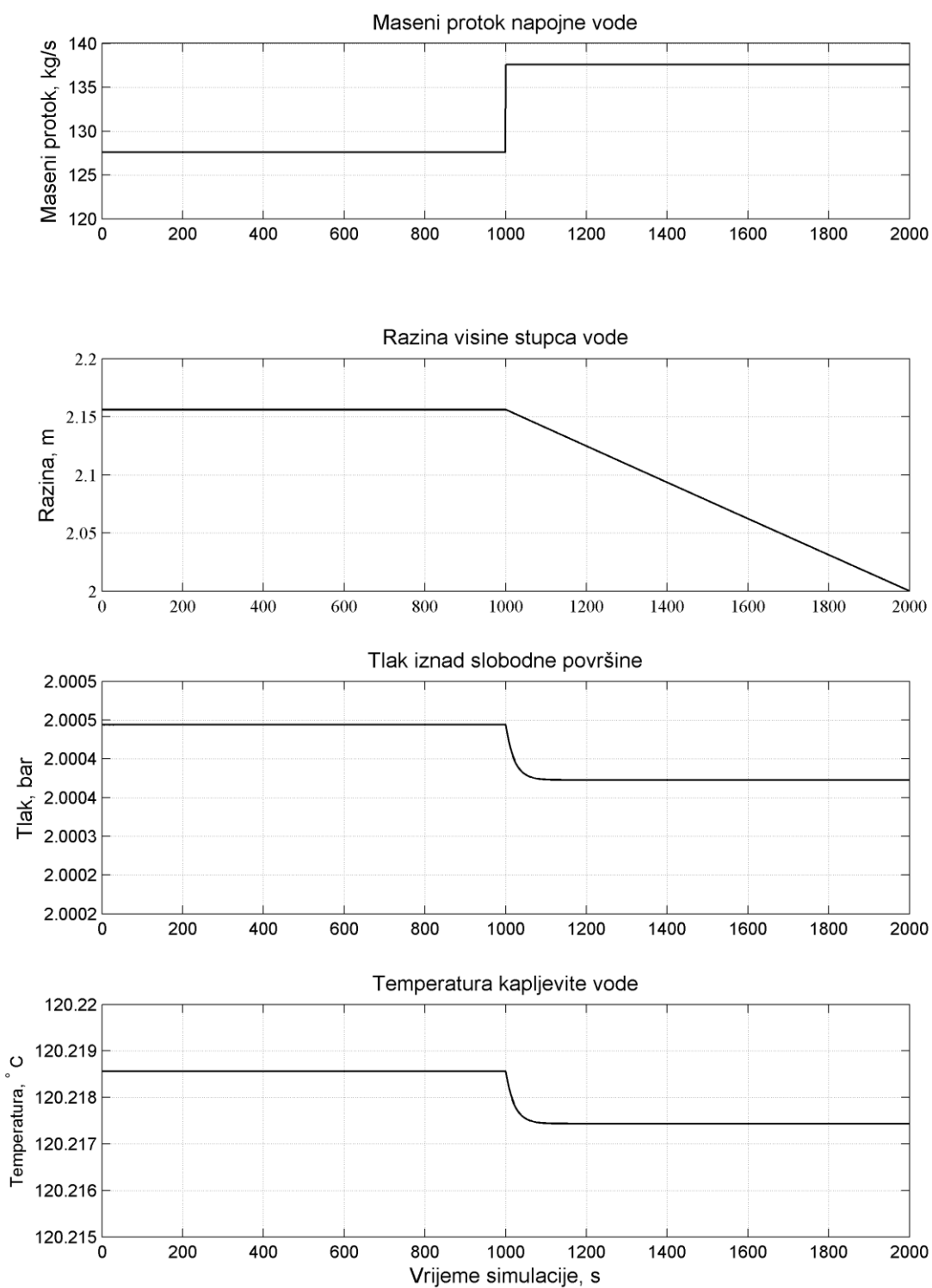
Slika 9. Promjena procesnih veličina pri poremećaju tlaka prigušenja pregrijane pare

#### 4.1.4. Promjena protoka pare za hladno međupregrijanje



Slika 10. Promjena procesnih veličina pri poremećaju tlaka prigušenja pare za hl. međupreg.

### 4.1.5. Promjena protoka napojne vode



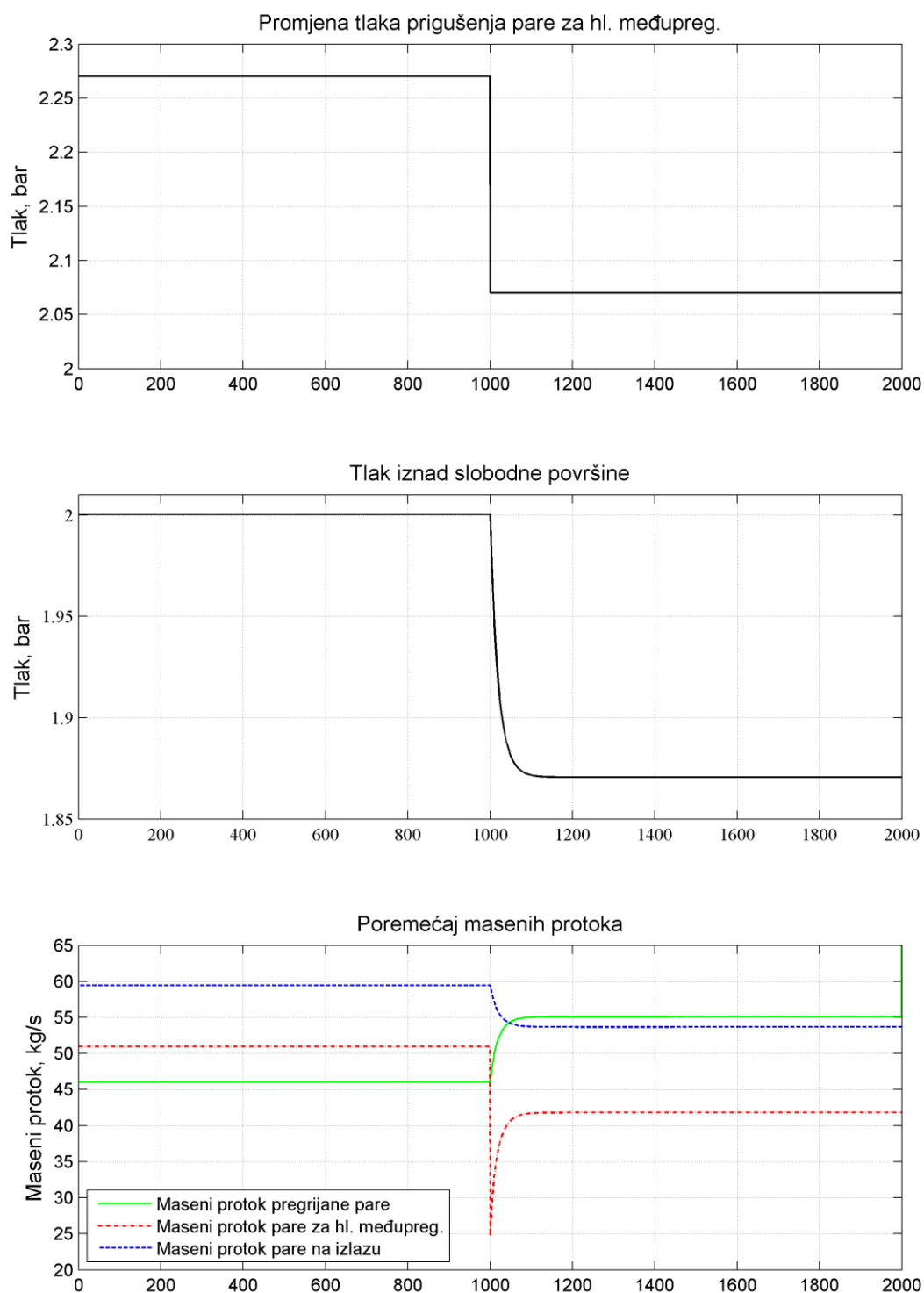
Slika 11. Promjena procesnih veličina pri poremećaju masenog protoka napojne vode

#### 4.1.6. Analiza

Iz priloženih dijagrama je vidljivo kako na povećanje razine stupca vode potiče povećanje masenog protoka vode iz kondenzatora, povećanje masenog protoka dodatne vode, povećanje protoka pregrijane pare, smanjenje masenog protoka pare za hladno međupregrijanje i smanjenje masenog protoka napojne vode. Na povećanje tlaka iznad slobodne površine potiče smanjenje masenog protoka vode iz kondenzatora, smanjenje masenog protoka dodatne vode, povećanje masenog protoka pregrijane pare, povećanje masenog protoka pare za hladno međupregrijanje i smanjenje masenog protoka napojne vode. Na povećanje temperature potiče smanjenje masenog protoka vode iz kondenzatora, smanjenje masenog protoka dodatne vode, povećanje masenog protoka pregrijane pare, povećanje masenog protoka pare za hladno međupregrijanje i smanjenje masenog protoka napojne vode.

Isto tako valja uočiti da povećanje masenog protoka napojne vode pri stacionarnom stanju za 10 kg/s ne utječe značajno na promjenu tlaka iznad slobodne površine i na promjenu temperature kapljevite vode, dok s druge strane, smanjenje tlaka prigušenja pare za hladno međupregrijanje pri stacionarnom stanju za 0.2 bar značajnije utječe na promjenu tlaka iznad slobodne površine i temperaturu isparavanja kapljevite vode od poremećaja tlaka prigušenja pregrijane pare.

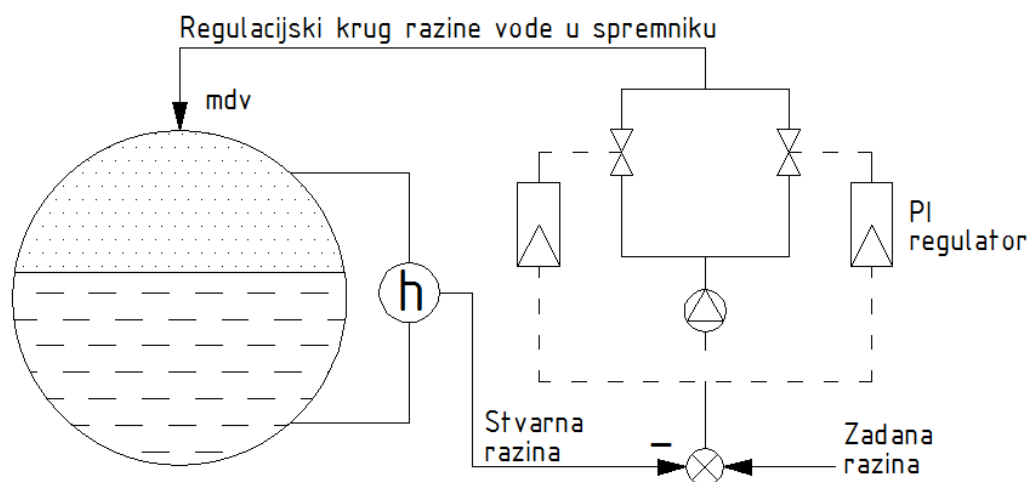
Pri promjeni tlaka prigušenja pare za hladno međupregrijanje došlo je do blagog pada razine vode jer je, u tom trenutku došlo, do neravnoteže između ulaznih i izlaznih tokova mase, kako je prikazano na slici 12. Prilikom poremećaja tlaka prigušenja, odnosno, masenog protoka pare za hladno međupregrijanje, došlo je do naglog pada ulaznih tokova mase, što je rezultiralo većim izlaznim tokovima zbog čega je izašlo više vode nego li je u sustav ušlo. Nakon što su se maseni tokovi stacionirali, dolazi do povećanja razine jer se u sustav unosi premalo energije kako bi dio vode ispravio.



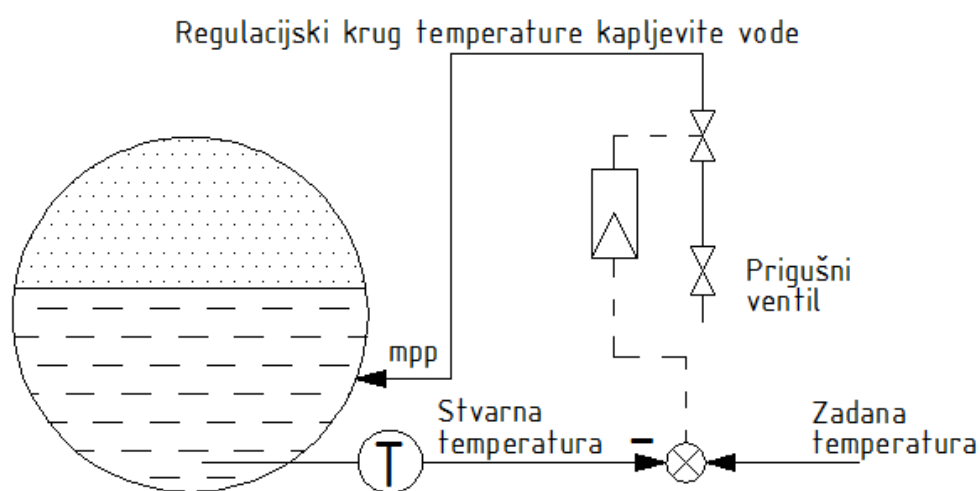
Slika 12. Poremećaj masenih tokova pri poremećaju tlaka prigušenja pare za hl. međupreg.

## 4.2. Koncept regulacije otplinjača

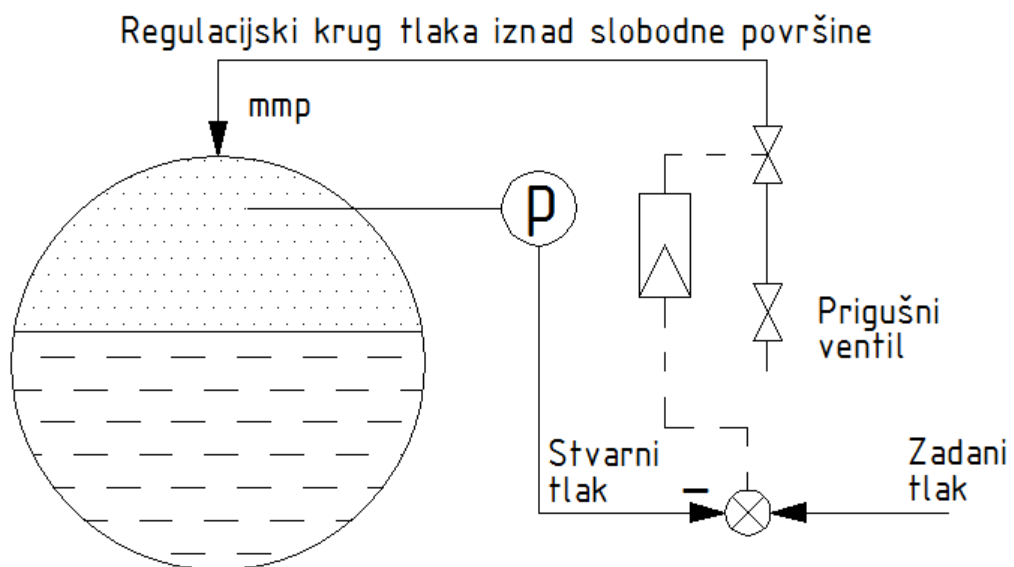
Nakon analize promjene masenih protoka pri stacionarnom stanju, u simulaciju otplinjača uvest će se regulacija tri fizikalne veličine. To su regulacija masenog protoka dodatne vode koja služi za regulaciju razine visine, regulacija masenog protoka pregrijane pare koja služi za zagrijavanje napojne vode i regulacija masenog protoka pare za hladno međupregrijanje koje služi za uspostavljanje traženog tlaka. Prije analize reguliranog spremnika objasniti će se što je to regulacija i kako se postiže.



Slika 13. Koncept regulacijskog kruga razine stupca vode



Slika 14. Koncept regulacijskog kruga temperature

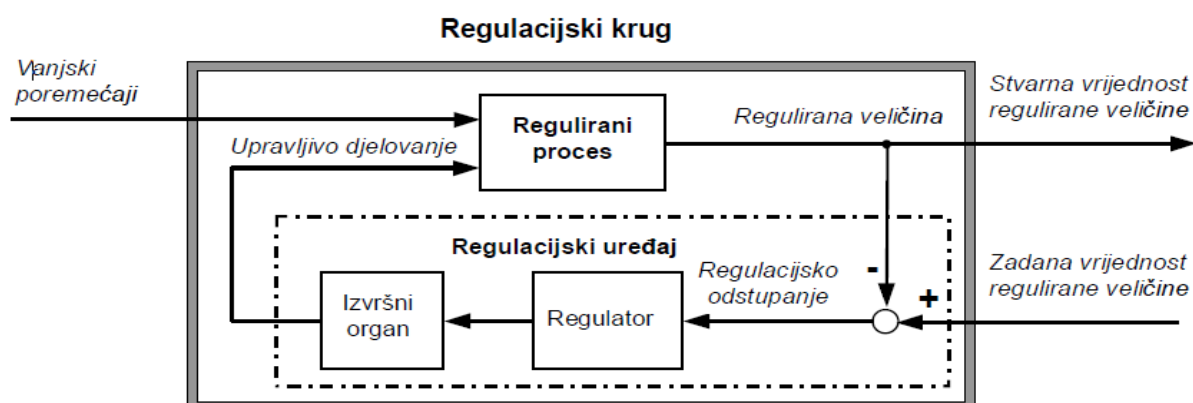


Slika 15. Koncept regulacijskog kruga tlaka



## 5. Regulacija procesa

Regulacija je djelovanje na neki tehnološki proces kako bi se jedna ili više procesnih veličina održavala na željenoj razini unatoč utjecajima okoline. Regulirana veličina je fizikalna veličina kojoj stvarnu vrijednost treba održavati što bližom njezinoj zadanoj vrijednosti. Stvarna vrijednost regulirane veličine izravno odražava stanje reguliranoga procesa. Ona se mijenja kao posljedica vanjskih utjecaja, poremećaja i upravljivoga djelovanja. Razlika između zadane i stvarne vrijednosti regulirane veličine jest regulacijsko odstupanje (otklon).



Slika 16. Opći prikaz regulacijskog kruga

Svrha regulacije je minimiziranje regulacijskog odstupanja tijekom vremena, ali i održavanje vrijednosti određenih fizikalnih veličina u procesu (reguliranih veličina) na zadanoj vrijednosti usprkos promjenama intenziteta tehnološkog procesa i promjenjivim utjecajima okoline, a ostvaruje se svrsishodnim promjenama upravljive veličine

### 5.1. Nadređena i podređena regulacija

Kako je već prije rečeno, u sklopu simulacije potrebno je regulirati razinu visine i tlak u spremniku napojne vode. Temperatura napojne vode određena je tlakom iznad slobodne površine.

Regulacija razine vode ostvaruje se promjenom protoka dodatne vode, a regulacija temperature, odnosno, tlaka ostvaruje se promjenom protoka pregrijane pare i promjenom protoka pare za hladno međupregrijanje. Ove veličine se ubrajaju pod podređenu regulaciju. Regulacijski sustav s regulacijom jedne procesne veličine naziva se regulacijskim krugom.

Pod nadređenu regulaciju ubrajaju se fizikalne veličine koje nisu pod kontrolom reguliranih veličina, odnosno, za te veličine zaduženi su elementi sustava koji nisu opisani u ovoj simulaciji. U nadređenu regulaciju ubrajaju se maseni protok vode iz kondenzatora i maseni protok napojne vode te svi ulazni tlakovi i temperature.

Za regulaciju podređenih veličina koristi se PI regulator. Regulatori su ugrađeni u sustav tako da kontroliraju otvorenost ventila kroz kojih struji regulirana veličina.

## 5.2. PID regulator

PID, odnosno, proporcionalno-integracijski-derivacijski regulator je uređaj za kontrolu procesa izveden kao paralelni spoj proporcionalnog, integracijskog i derivacijskog člana..

$$i(t) = P * \epsilon(t) + I * \int_0^t \epsilon(t) d\tau + D * \frac{d\epsilon(t)}{dt}$$

gdje je:

$i(t)$  ... izlazna vrijednost

$\epsilon(t)$  ... razlika između zadane i stvarne vrijednosti (odstupanje)

$P$  ... koeficijent pojačanja ( $P = konst. > 0$ ); služi kao protuteža trenutne vrijednosti odstupanja

$I$  ... koeficijent integracijskog djelovanja ( $I = konst. > 0$ ); služi kao protuteža prošlih vrijednosti odstupanja

$D$  ... koeficijent derivacijskog djelovanja ( $D = konst. > 0$ ); služi kao protuteža predviđenih budućih vrijednosti odstupanja (predviđena buduća vrijednost odstupanja utemeljena su na trenutnoj stopi promjene vrijednosti odstupanja)

PID regulator možemo podesiti da radi kao PI regulator tako da se vrijednost derivacijskog djelovanja izjednači s 0 što rezultira negiranjem bilo kakvog derivacijskog djelovanja.

## 5.3. Referentno stanje simulacije

Za referentno stanje otplinjača određen je maseni protok vode iz kondenzatora 85 kg/s, najveći maseni protok dodatne vode 50 kg/s i potrebni maseni protok napojne vode 100 kg/s. Spremnik napojne vode je u početnom trenutku dopola pun vode, temperatura vode je 50°C, a tlak u spremniku je jednak tlaku okoliša. Duljina spremnika je 20 m, a promjer spremnika je 3.6 m. Unutarnji promjer cijevi za dovod pregrijane pare je 0.25 m, u otplinjač ulaze 4 takve cijevi, isto vrijedi i za unutarnji promjer i količinu cijevi za dovod pare za hladno međupregrijanje. Prije ulaza u otplinjač, voda iz kondenzatora prolazi kroz regenerativne grijače koji joj podižu temperaturu na 90°C, temperatura dodatne vode iznosi 20°C. Pregrijana para se uzima iz generatora pare pri tlaku 180 bar i temperaturi 530°C, prije ulaza u otplinjač, pregrijana para se prigušuje na tlak od 3 bar. Para za hladno međupregrijanje oduzima se iz niskotlačnog dijela turbine pri temperaturi 180°C i prigušuje na 2.5 bar. Kako bi se aproksimirala gustoća heterogene smjese kapljevite vode u kojoj se nalaze mjehurići pare, uzima se da gustoća kapljevite vode u spremniku iznosi 900 kg/m<sup>3</sup>. Tlak okoliša iznosi 1.01 bar.

Tražene regulirane vrijednosti su razina visine 2.16 m i tlak iznad slobodne površine 2 bar.

Za potrebe regulacije, u simulaciju će se uvesti sljedeće jednadžbe:

$$m'_{dv} = \frac{m_{dv}}{2} + \frac{m_{dv}}{4} * f_1(h) + \frac{m_{dv}}{4} * f_2(h) \quad (11)$$

gdje  $m'_{dv}$  označava dotok dodatne vode u otplinjač, a  $f_1(h)$  i  $f_2(h)$  vrijednosti upravljačkog signala otvorenosti ventila koju određuje PI regulator spojen u regulacijski krug razine stupca vode.

$$m'_{pp} = \frac{m_{pp}}{2} + \frac{m_{pp}}{2} * f_3(\vartheta) \quad (12)$$

gdje  $m'_{pp}$  označava dotok pregrijane pare u otplinjač, a  $f_3(\vartheta)$  vrijednost upravljačkog signala otvorenosti ventila koju određuje PI regulator spojen u regulacijski krug temperature napojne vode.

$$m'_{mp} = \frac{m_{mp}}{2} + \frac{m_{mp}}{2} * f_4(p) \quad (13)$$

gdje  $m'_{mp}$  označava dotok pare za hladno međupregrijanje u otplinjač, a  $f_4(p)$  vrijednost upravljačkog signala otvorenosti ventila koju određuje PI regulator spojen u regulacijski krug tlaka iznad slobodne površine u otplinjaču.

Vrijednosti svih upravljačkih signala kreću se u granicama od -1 do +1, što znači da će ventil biti potpuno zatvoren pri vrijednosti -1 i potpuno otvoren pri vrijednosti +1. Početna vrijednost svih upravljačkih signala je 0. Pri toj vrijednosti, kroz ventil struji 50% vrijednosti najvećeg mogućeg masenog protoka.

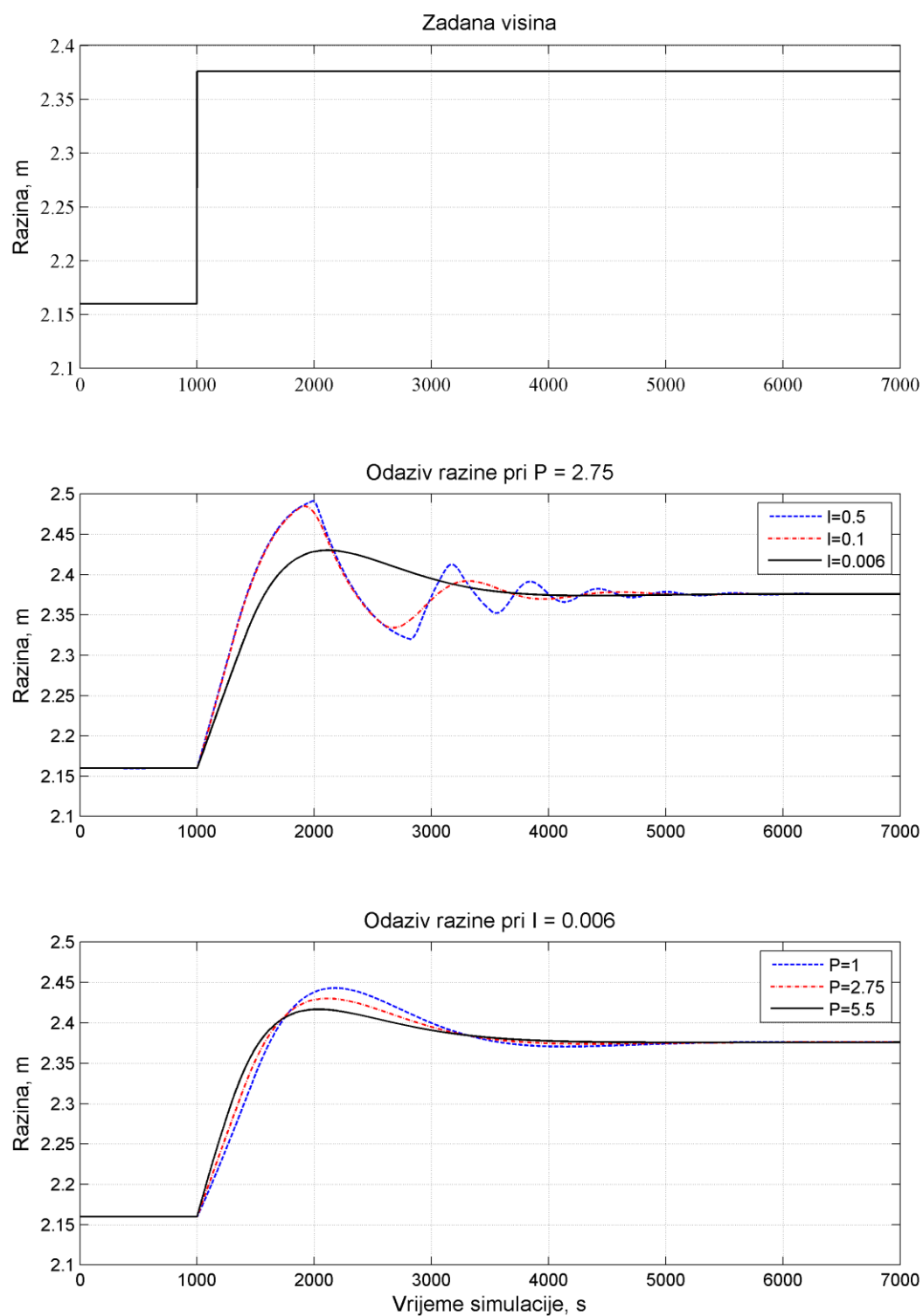
## 5.4. Analiza odaziva regularanih veličina pri referentnom stanju

Kako bi se izvršila analiza odaziva reguliranih veličina vrši se promjena zadanih veličina pri referentnom stanju procesa za različite vrijednosti koeficijenta pojačanja i koeficijenta integracijskog djelovanja u pojedninom regulacijskom krugu te se bilježi odaziv regulirane veličine.

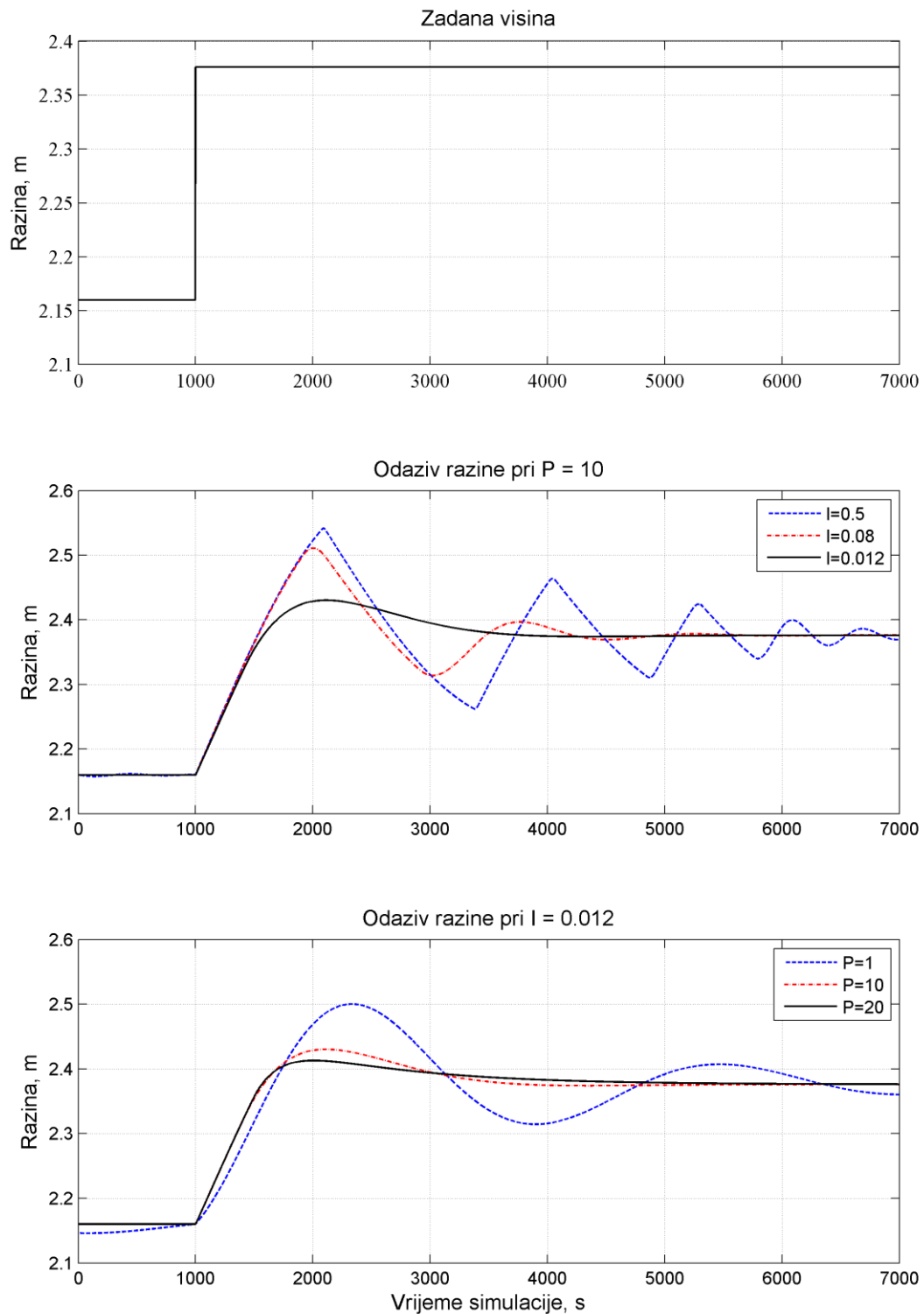
Regulacijski krug razine izveden je s dva PI regulatora. Jedan regulator u tom krugu podešen je tako da regulira sporije, uz veća odstupanja, što rezultira većim protokom, a drugi je podešen tako da regulira brže, uz manja odstupanja, što rezultira boljom kontrolom razine. Početne vrijednosti regulatora u ovom krugu su  $P=10$  i  $I=0.012$  za prvi regulator i  $P=2.75$  i  $I=0.006$  za drugi.

PI regulator u regulacijskom krugu temperature podešen je na vrijednosti  $P=28$  i  $I=0.13465$ , a PI regulator u regulacijskom krugu tlaka podešen je na vrijednosti  $P=6$  i  $I=0.08$ .

### 5.4.1. Promjena zadane razine stupca vode

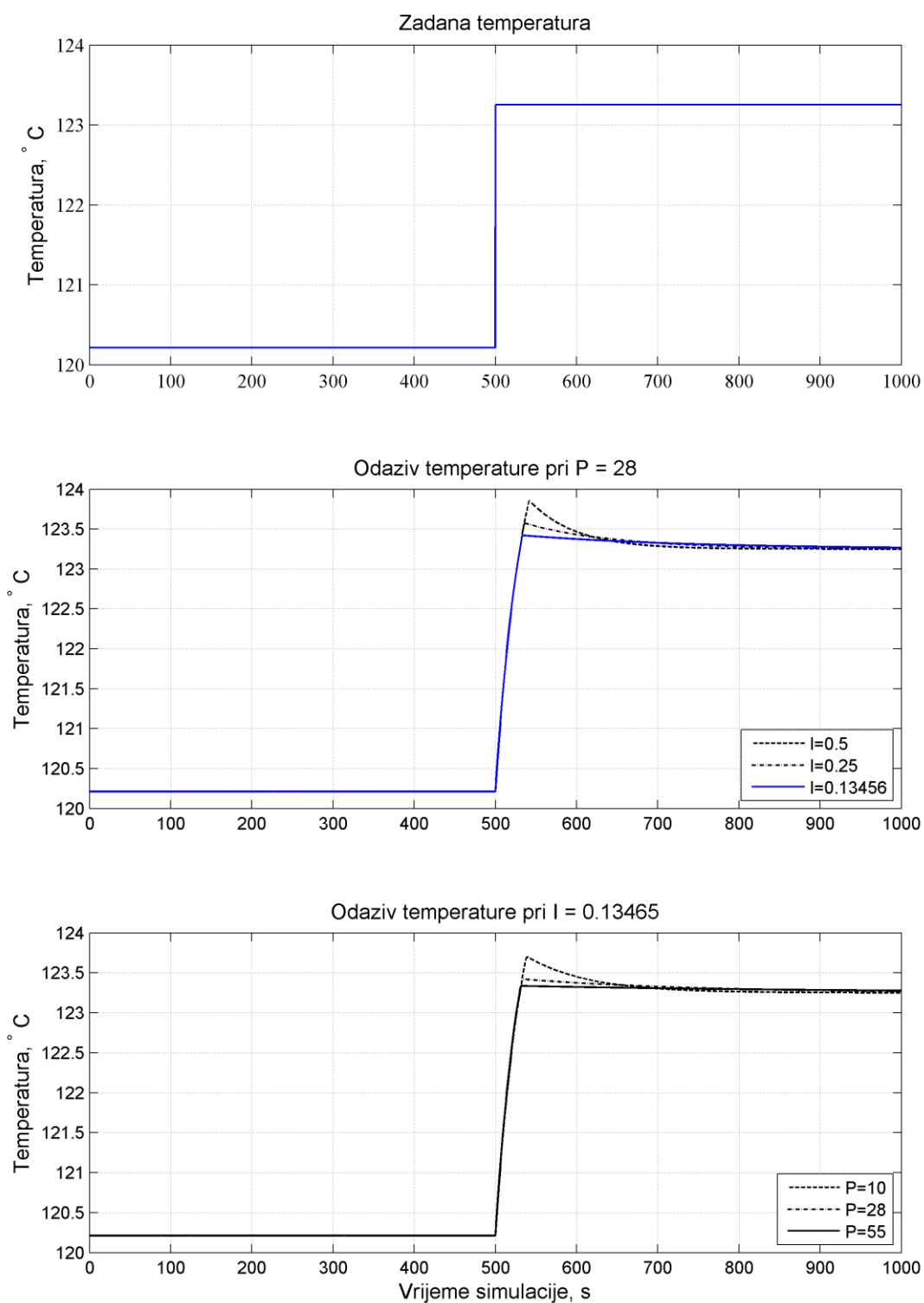


Slika 17. Promjena razine stupca vode pri promjeni P i I parametara bržeg regulatora



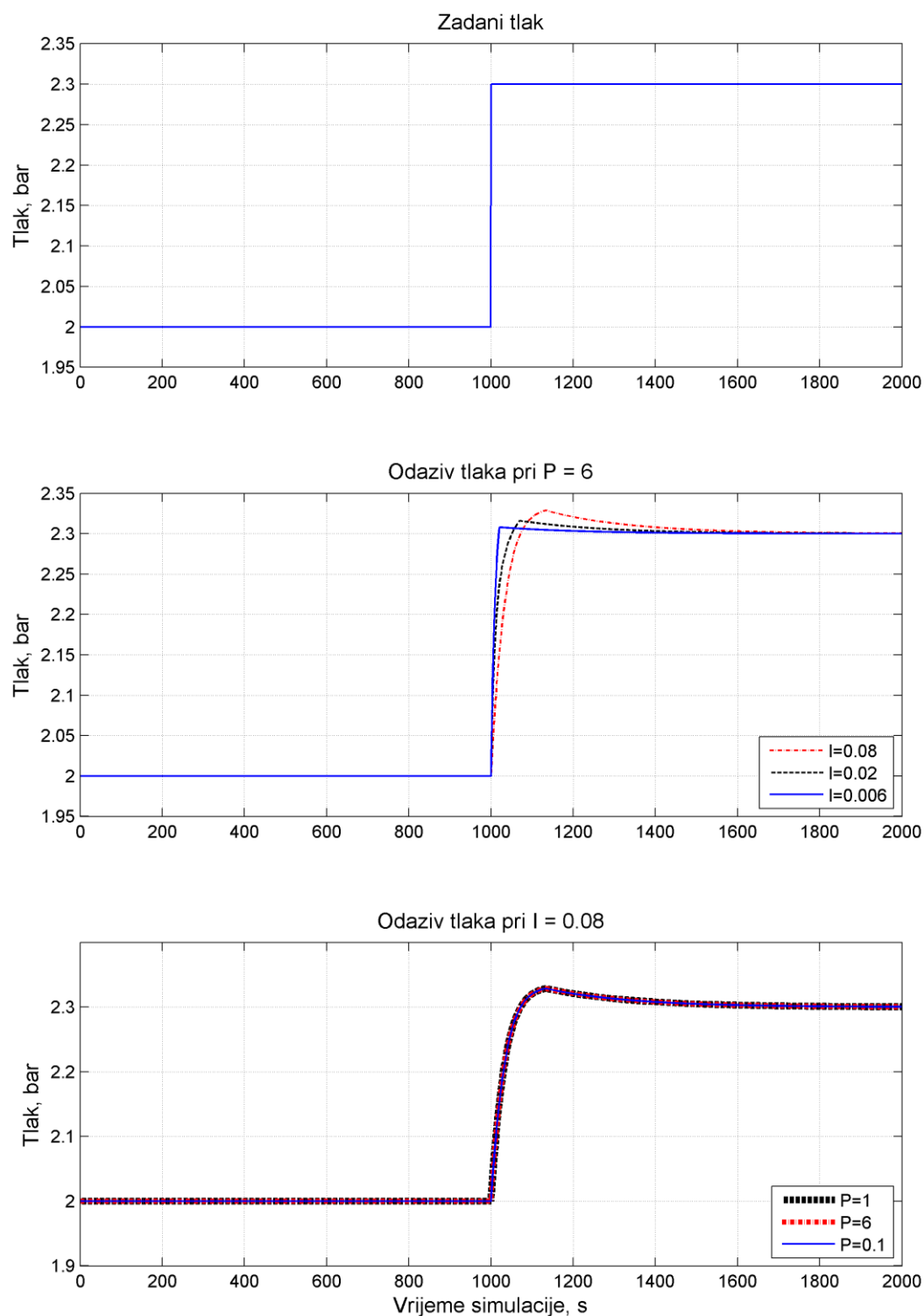
Slika 18. Promjena razine stupca vode pri promjeni P i I parametara sporijeg regulatora

### 5.4.2. Promjena zadane temperature isparavanja



Slika 19. Promjena temperature pri promjeni P i I parametara regulatora temperature

### 5.4.3. Promjena zadanog tlaka u otplinjaču



Slika 20. Promjena tlaka pri promjeni P i I parametara regulatora tlaka

#### 5.4.4. Analiza

Iz dijagrama je vidljivo kako povećanje koeficijenta pojačanja pridonosi brzini stabiliziranja regulirane veličine, a smanjenje koeficijenta integracijskog djelovanja pridonosi smanjenju odstupanja regulirane veličine.

Valja uočiti da relativno velika promjena koeficijenta pojačanja kod regulacije temperature ne pridonosi značajno promjeni temperature vode, kao niti promjena koeficijenta integracijskog djelovanja kod dovoljno velikog koeficijenta pojačanja.

Na slici 19. je vidljivo kako promjena koeficijenta pojačanja regulatora tlaka uopće ne utječe na promjenu tlaka. Razlog tome jeste da je temperatura isparavanja, koju regulira regulator temperature, vezana na tlak, koji regulira regulator tlaka. Uslijed premalog porasta tlaka ili prevelikog utjecaja regulatora temperature, regulator tlaka neće biti u mogućnosti djelovati na proces. Ovaj utjecaj prikazan je na slici 20., na kojoj se može uočiti kako je maseni protok pare za hladno međupregrijavanje isključen iz sustava.

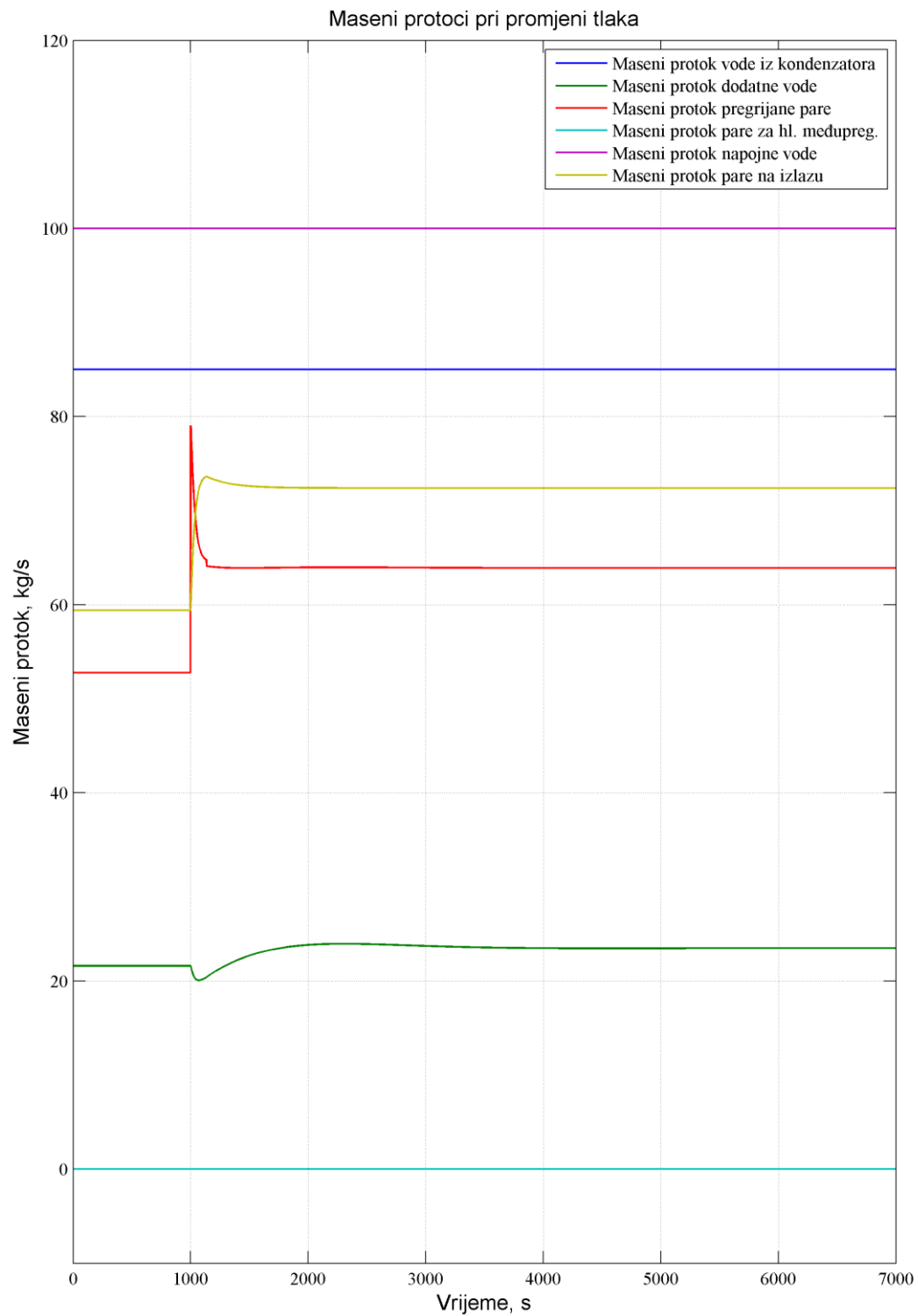
U ovom slučaju, entalpija pregrijane pare koja se unosi u spremnik je dovoljna da zagrije vodu i podigne temperaturu, a time i tlak na zadanu vrijednost.

Na slici 21., prikazana je promjena tlaka i temperature kada je tlak prigušenja pregrijane pare smanjen na 2.5 bar (ostala referentna stanja nisu promijenjena). PI regulator u regulacijskom krugu temperature podešen je na vrijednosti  $P=28$  i  $I=0.13465$ , a PI regulator u regulacijskom krugu tlaka podešen je na vrijednosti  $P=6$  i  $I=0.08$ . Na slici 22., prikazan je poremećaj masenih protoka pri promjeni zadanog tlaka s 2 bar na 2.3 bar pri tlaku prigušenja pregrijane pare 2.5 bar.

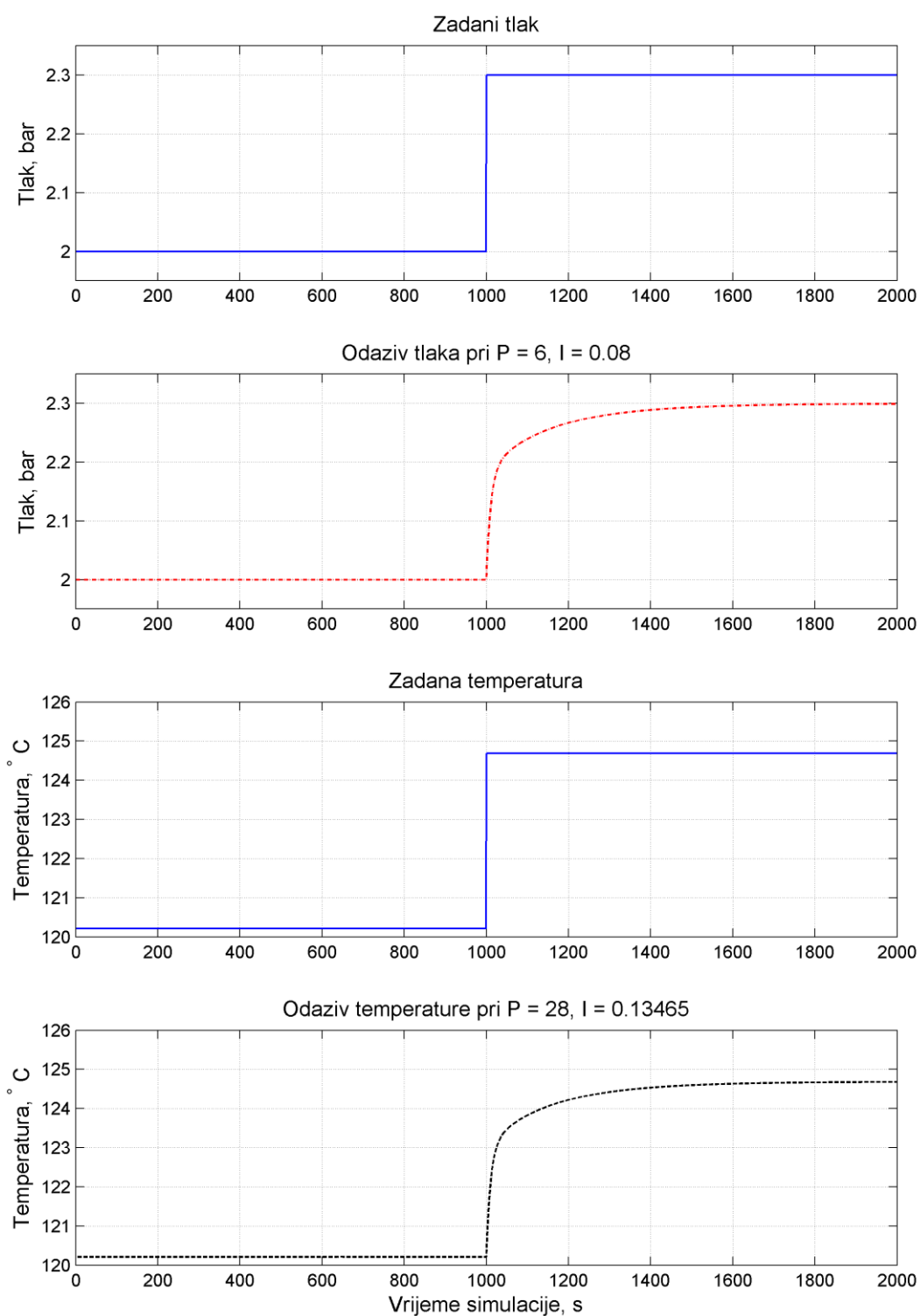
U ovom slučaju, entalpija pregrijane pare nije dovoljna da održi tlak što rezultira povećanjem protoka pare za hladno međupregrijanje. Iznenadni skok protoka pare za hl. međupreg. rezultat je prebrzog djelovanja regulatora, odnosno, prevelikog koeficijenta pojačanja.

Povećanje zadanog tlaka rezultiralo je smanjenjem najvećeg mogućeg masenog protoka pregrijane pare, ali se povećanjem protoka pare za hl. međupreg. održao potreban dotok energije u proces kako bi se voda zagrijala do zadane temperature.

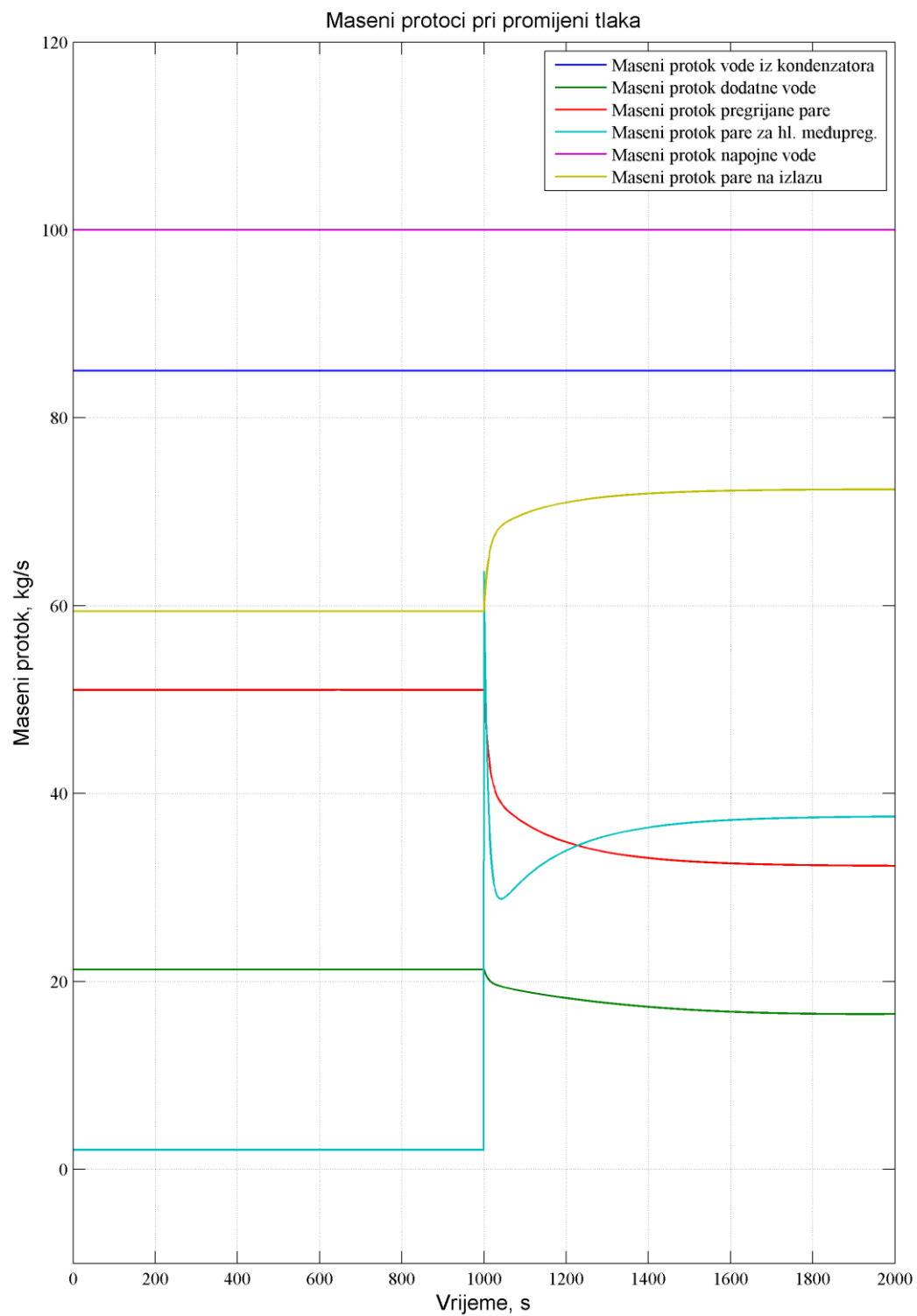




Slika 21. Maseni protoci pri refentnom stanju i poremećaju tlaka iz 4.4.3.



Slika 22. Promjena tlaka i temperature pri tlaku prigušenja pregrijane pare 2.5 bar



Slika 23. Maseni protoci pri tlaku prigušenja pregrijane pare 2.5 bar i poremećaju tlaka

## 6. Simulacija promjenjivih pogonskih režima

Za zaključak i potpunu analizu procesa potrebno je simulirati utjecaj promjenjivih pogonskih režima. Promjena pogonskih režima prikazana je promjenom protoka napojne vode i promjenom tlaka te održavanjem zadane razine prilikom tih promjena. Simulacija se izvodi pri referentnom stanju i sljedećim vrijednostima PI regulatora.

Vrijednosti regulatora u regulacijskom krugu razine su  $P=10$  i  $I=0.012$  za prvi regulator i  $P=2.75$  i  $I=0.006$  za drugi. PI regulator u regulacijskom krugu temperature podešen je na vrijednosti  $P=28$  i  $I=0.13465$ , a PI regulator u regulacijskom krugu tlaka podešen je na vrijednosti  $P=2$  i  $I=0.1$ .

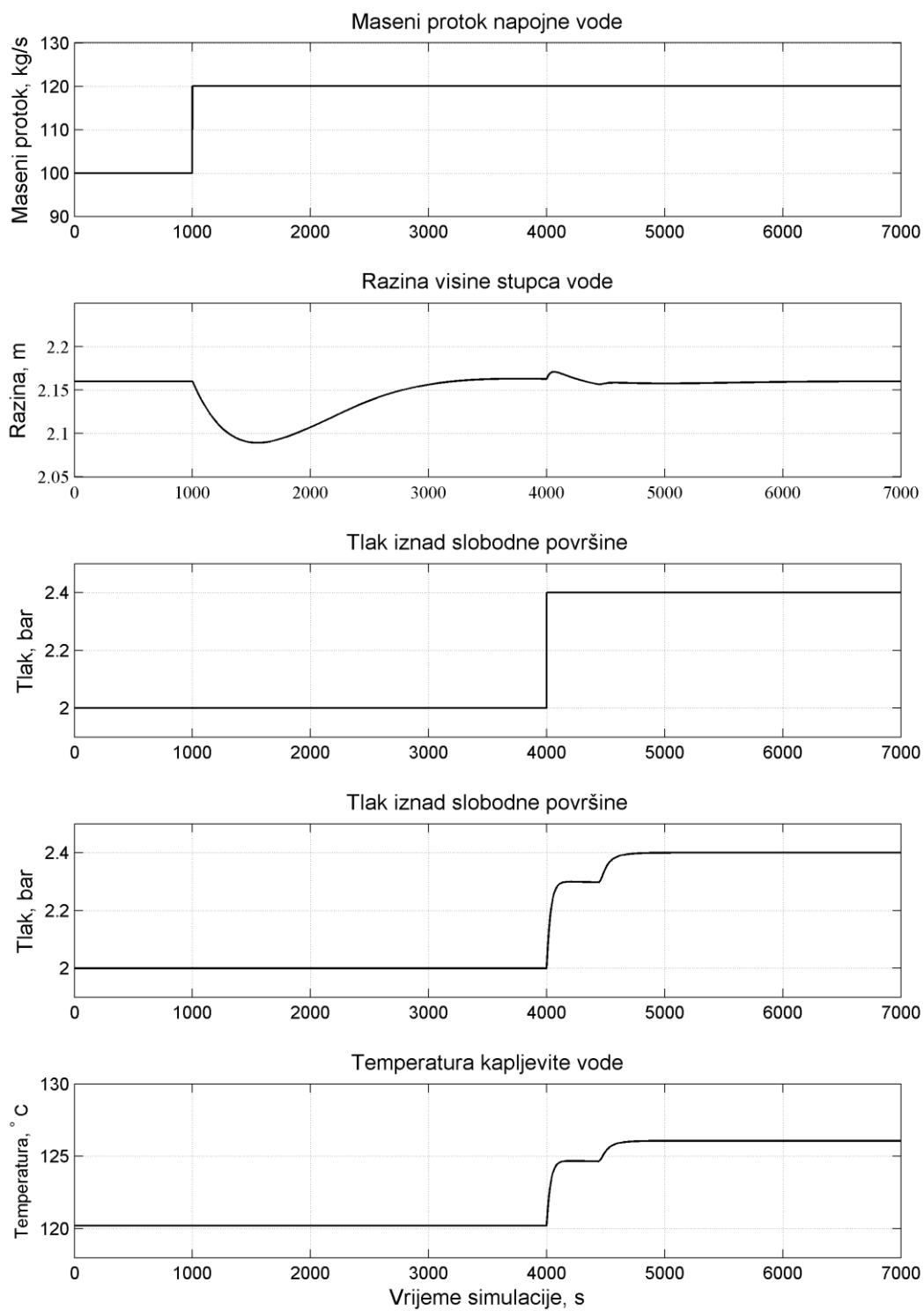
Prvo se simulira povećanje potrošnje napojne vode s 100 kg/s na 120 kg/s u 1000. sekundi simulacije i povećanje tlaka s 2 bar na 2.4 bar u 4000. sekundi (slike 24. i 25.).

Zatim se simulira smanjenje protoka napojne vode s 100 kg/s na 90 kg/s u 1000. sekundi simulacije i smanjenje tlaka s 2 bar na 1.6 bar u 4000. sekundi (slike 26. i 27.).

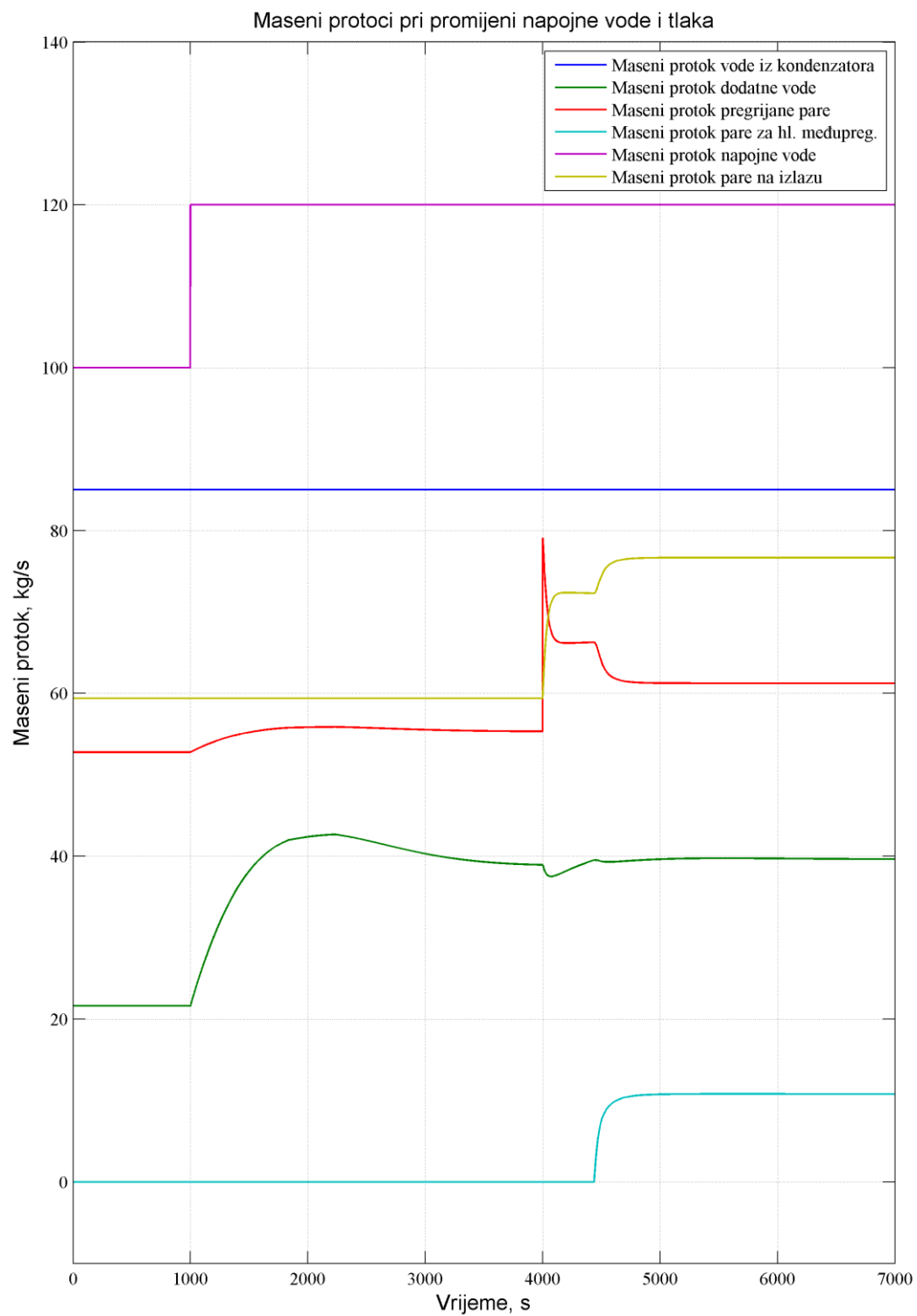
Na slikama 24. i 26. je vidljivo da promjena protoka napojne vode ne utječe na tlak iznad slobodne površine i temperaturu, ali zato promjena tlaka utječe na promjenu razine. Izvedba regulacijskog kruga razine omogućava relativno brzi povrat razine u zadanu vrijednost uz male oscilacije.

Na slici 25. vidljivo je da je regulacija temperature dobro izvedena za potrebe zagrijavanja dodatne vode, ali je loše izvedena, zbog naglog skoka, za potrebe održavanja tlaka. Tlak je dovoljno povećan da se osigura uključenje pare za hladno međupregrijanje, što znači da sama entalpija pregrijane pare pri referentnom stanju nije dovoljna da održi temperaturu i tlak na zadanim vrijednostima.

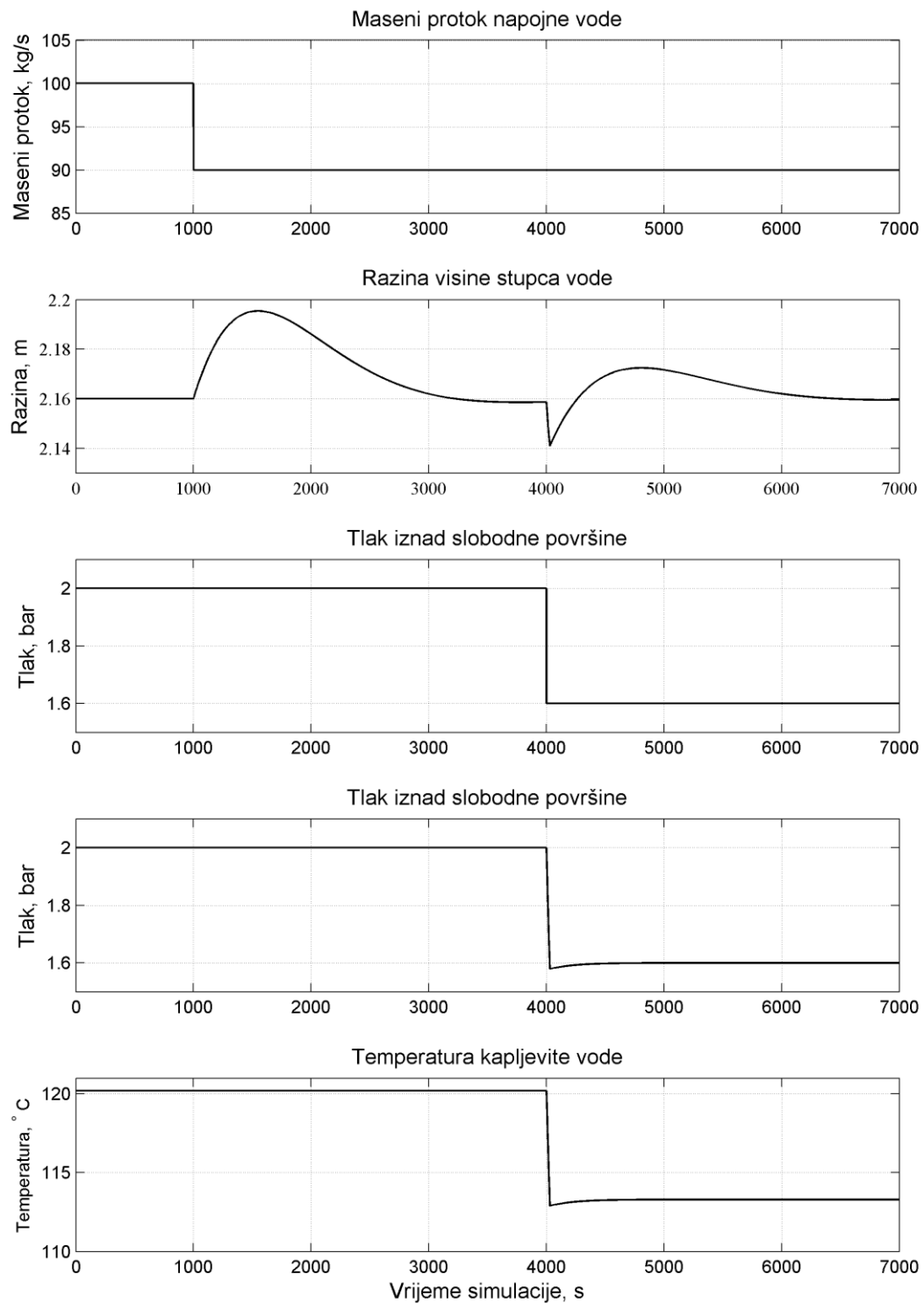
Na slici 27. je vidljivo da pri smanjenju zadanog tlaka, odnosno, temperature isparavanja dolazi do trenutnog gašenja protoka pregrijane pare kako bi se smanjio dotok topline u sustav, a time bi se snizila temperatura kapljevite vode. Taj je trenutni skok posljedica prevelikog koeficijenta pojačanja.



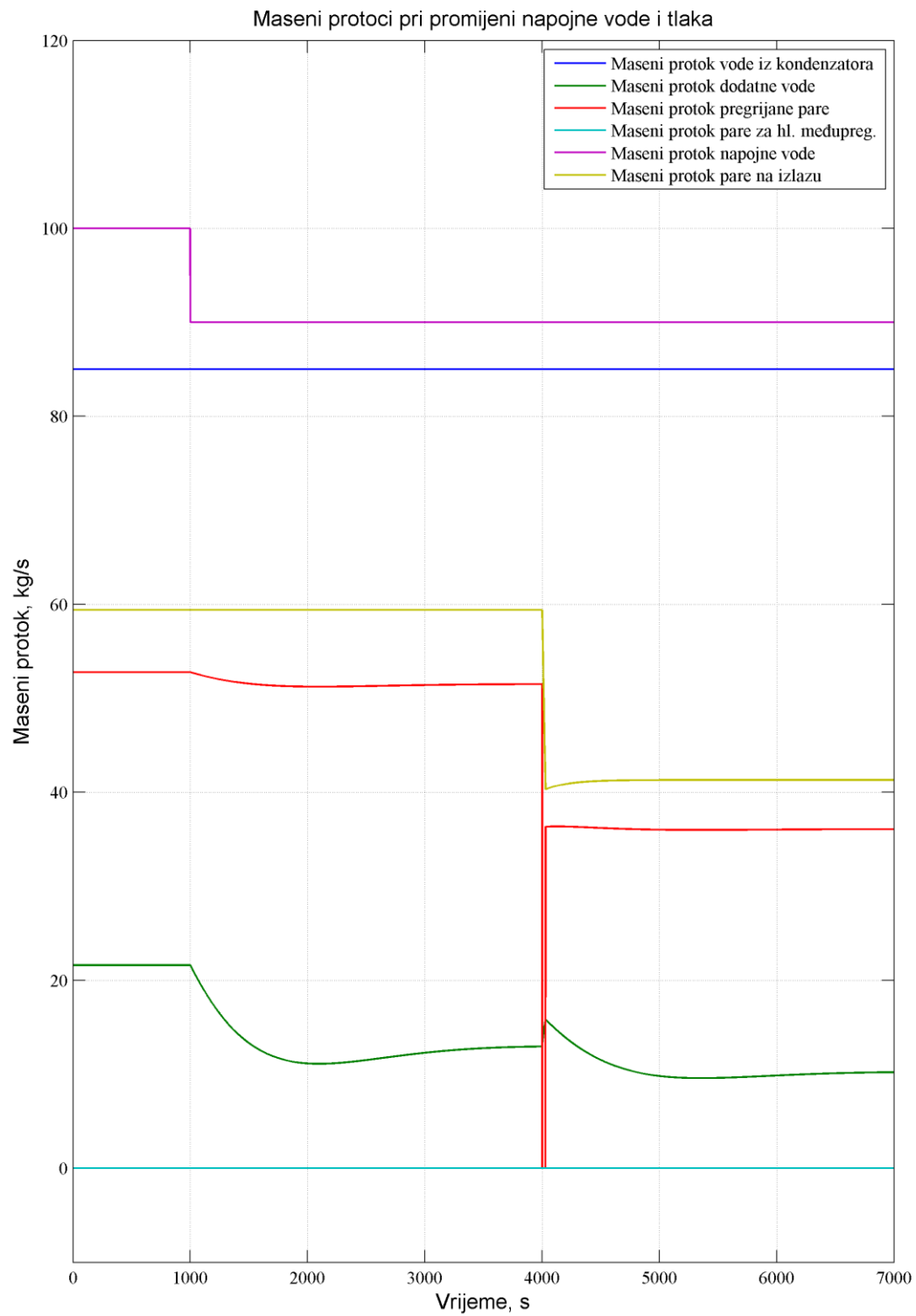
Slika 24. Odaziv reguliranih veličina pri povećanju protoka napojne vode i povećanja tlaka



Slika 25. Promjena masenih protoka pri poremećaju napojne vode i tlaka iz slike 24.



Slika 26. Odaziv reguliranih veličina pri smanjenju protoka napojne vode i smanjenju tlaka



Slika 27. Promjena masenih protoka pri poremećaju napojne vode i tlaka iz slike 26.



## 7. Zaključak

Pravilno podešenom regulacijom moguće je tehnološki proces dobro voditi unatoč promjeni unutarnjih i vanjskih poremećaja. Što je veći broj regulatora u pojedinom regulacijskom krugu to je bolja regulacija regulirane veličine, odnosno procesa, ali u isto vrijeme to komplicira i poskupljuje izvedbu.

Problem nastaje kada jedan od regulacijskih krugova sadrži prejako postavljen regulator koji onemogućava djelovanje drugih regulacijskih krugova te time pogoršava izvedbu regulacije procesa. Važno je da se svi regulatori podeše tako da ne dođe do isključivanja pojedinih regulacijskih krugova.

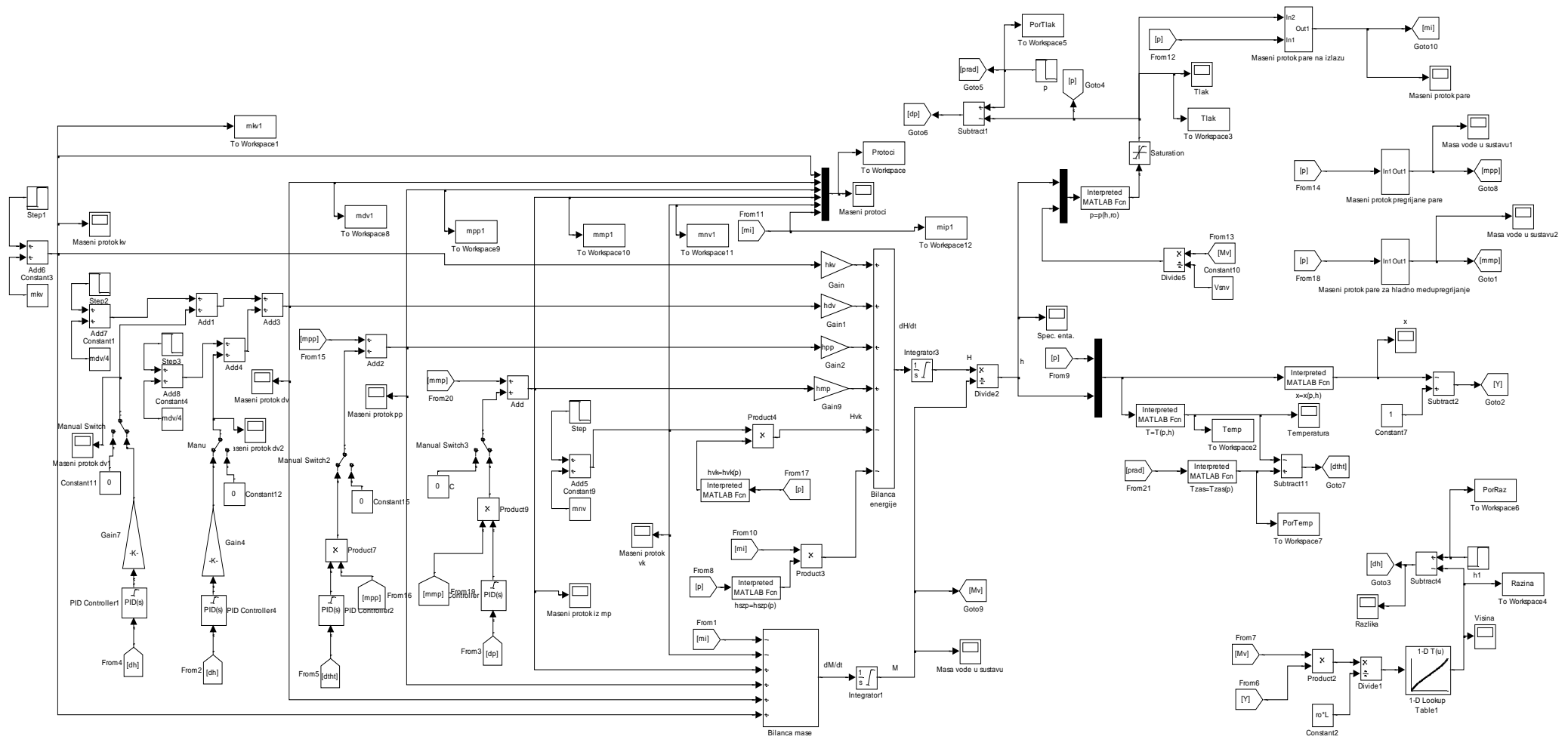
Parametri ulaznih veličina isto tako utječu na odabir koeficijenata pojedinih regulatora stoga je bitno provesti analizu pri različitim ulaznim vrijednostima kako ne bi došlo pogoršanja procesa pri raznim poremećajima.

Uz dobre pretpostavke, moguće je izraditi matematički model dinamičkog procesa koji vrlo dobro aproksimirao stvarni proces te nam pruža uvid u odazive procesnih veličina pri unutarnjim i vanjskim poremećajima. Uvidom u proces bolje shvaćamo djelovanje različitih poremećaja na proces te iz tih saznanja možemo odrediti najbolji način regulacije tog procesa.

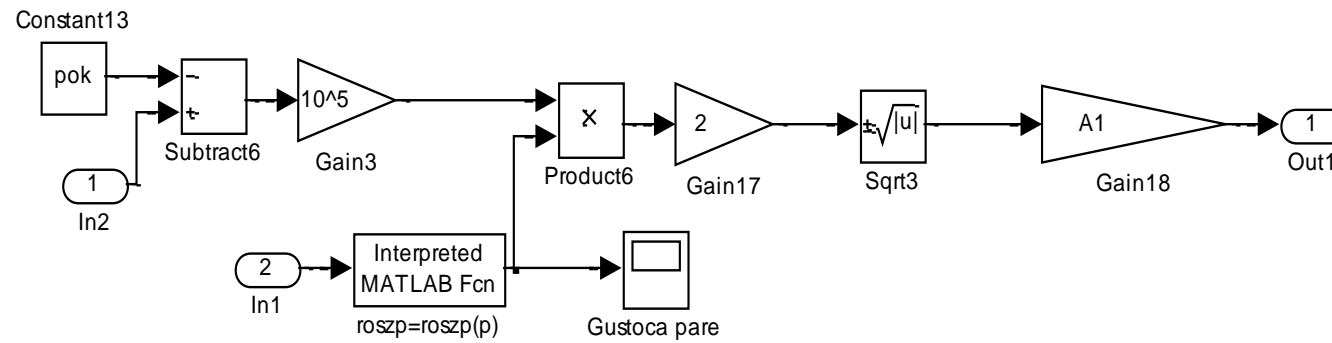
## 8. Literatura

1. Prelec, Z. : Energetska postrojenja (Regenerativni zagrijači napojne vode), Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci
2. Galović, A. : Termodinamika 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
3. Šerman, N., Lončar, D. : Regulacija procesa, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
4. Virag, Z., Šavar, M., Džijjan, I. : Mehanika fluida 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
5. Matlab <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
6. XSteam <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817-x-steam--thermodynamic-properties-of-water-and-steam>

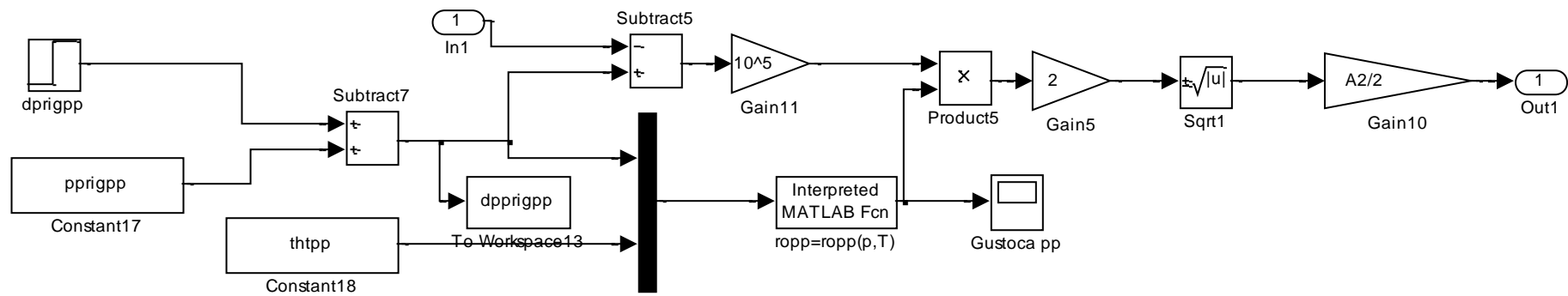
## 9. Prilog – Simulink sheme modela



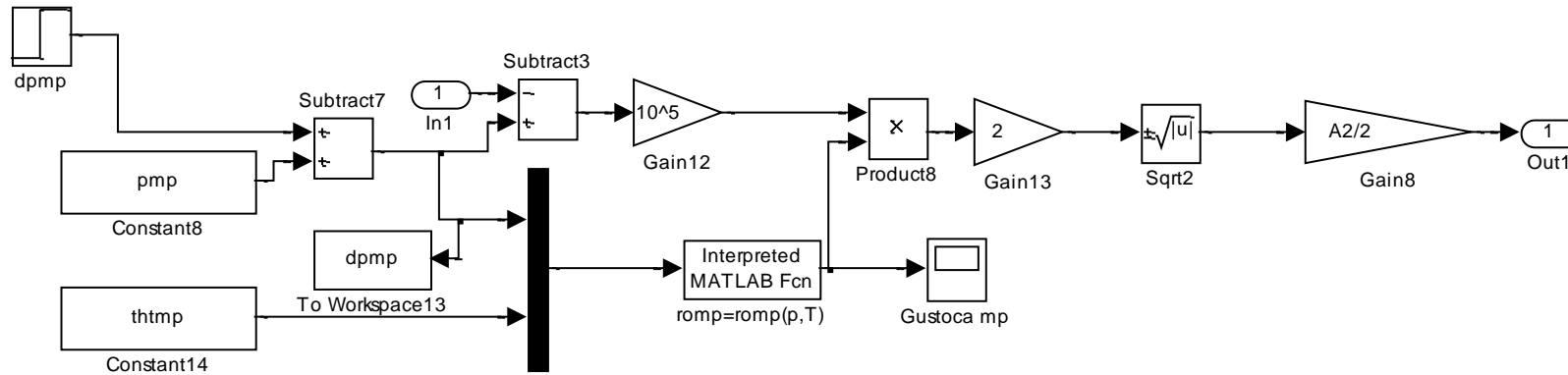
Shema Simulink modela matematičkog modela otplinjača



Shema Simulink modela jednadžbe strujanja pare na izlazu



Shema Simulink modela jednadžbe strujanja pregrijane pare



Schema Simulink modela jednadžbe strujanja pare za hladno međupregrijanje